

THESES

PRESENTEES A LA FACULTE DES
SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE
NANCY POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

PAR YVES DELACHAMBRE
Ingénieur E.N.S.I.C.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'ECOULEMENT D'UNE SUSPENSION
A TRAVERS UN MILIEU POREUX ET DU MECANISME DE LA FILTRATION

SOUTENUES LE

1966, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

M. R. GIBERT	Président
M. J. BASTICK	Examineurs
M. P. LE GOFF	

THESES

PRESENTEES A LA FACULTE DES
SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE
NANCY POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

PAR YVES DELACHAMBRE
Ingénieur E.N.S.I.C.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'ECOULEMENT D'UNE SUSPENSION
A TRAVERS UN MILIEU POREUX ET DU MECANISME DE LA FILTRATION

SOUTENUES LE

1966, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

M. R. GIBERT	Président
M. J. BASTICK	Examineurs
M. P. LE GOFF	

Doyen : M. AUBRY

Assesseur : M. GAY

Doyens Honoraires : MM. CORNUBERT - DELSARTE - URION - ROUBAULT.

Professeurs Honoraires : MM. CROZE - RAYBAUD - LAFFITTE - LERAY - JULY - LAPORTE
EICHHORN - GODEMENT - DUBREUIL - L. SCHWARTZ - DIEUDONNE - DE MALLEMANN - LONG-
CHAMBON - LETORT - DODE - GAUTHIER - GOUDET - OLMER - CORNUBERT - CHAPELLE -
GUERIN - WAHL.

Maîtres de Conférences Honoraires : MM. LIENHART - PIERRET.

MM.

PROFESSEURS

URION	Chimie biologique	GAYET	Physiologie
DELSARTE	Analyse supérieure	MALAPRADE	Chimie
ROUBAULT	Géologie	MANGENOT	Botanique
CAPELLE	Mécanique rationnelle	HADNI	Physique
VEILLET	Biologie animale	BONVALET	Mécanique appliquée
BARRIOL	Chimie théorique	KERN	Minéralogie
BIZETTE	Physique	BASTICK	Chimie
GUILLIEN	Electronique	DUCHAUFOR	Pédologie
GIBERT	Chimie physique	NEEL	Chimie orga. industrielle
LEGRAS	Mécanique rationnelle	GARNIER	Agronomie
BOLFA	Minéralogie	WEPPE	Minéralogie appliquée
NICLAUSE	Chimie générale	BERNARD	Géologie appliquée
FAIVRE	Physique appliquée	CHAMPIER	Physique
AUBRY	Chimie minérale	REGNIER	Physico-chimie
DUVAL	Chimie	GAY	Chimie biologique
COPPENS	Radiogéologie	WERNER	Botanique
FRUHLING	Physique	CONDE	Zoologie
SUHNER	Physique expérimentale	STEPHAN	Zoologie
HILLY	Géologie	EYMARD	Calcul dif. et intégral
LE GOFF	Génie chimique	LEVISALLES	Chimie organique
CHAPON	Chimie biologique	Mme HERVE	Méthodes math. de la phys.
HEROLD	Chimie miné. indust.	GOSSE	Mécanique physique
SCHWARTZ B.	Exploitation minière		

MM.

MAITRES DE CONFERENCES

ROCCI	Géologie	JANOT	Physique M.P.C. (Epinal)
VUILLAUME	Psychophysiologie	JACQUIN	Pédologie et Chim. agric.
Mme BASTICK	Chimie M.P.C. (Epinal)	CACHAN	Entomologie appl.(ENSA)
GUDEFIN	Physique	MARTIN	Chimie M.P.C.
HORN	Physique propédeutique	MAINARD	Physique M.G.P.
FRENTZ	Biologie animale	DEPAIX	Probabilités et statist.

AUROUZE	Géologie	LALANNE	Mécanique (I.S.I.N.)
MARI	Chimie (I.S.I.N.)	OVAERT	Mathématiques
LAFON	Physique (I.S.I.N.)	PAULMIER	Mécanique expérimentale
FELDEN	Phys. théor. et nucléaire	VILLERMAUX	Génie chimique
FLECHON	Physique M.P.C.	HILY	Mathématiques M.P.C.
VIGNES	Métallurgie	GEORGE	Mathématiques S.P.C.N.
Mlle HUET	Mathématiques S.P.C.N.	PAIR	Mathématiques appliquées
DEVIOT	Physique du solide		
BLAZY	Minéralogie appliquée (ENSG)		
BALESDENT	Thermo. chim. appliquée	N.	Mécanique des fluides (I.S.I.N.)
		N.	Physiologie animale

SECRETAIRE PRINCIPAL : C. CARON

A mon Maître

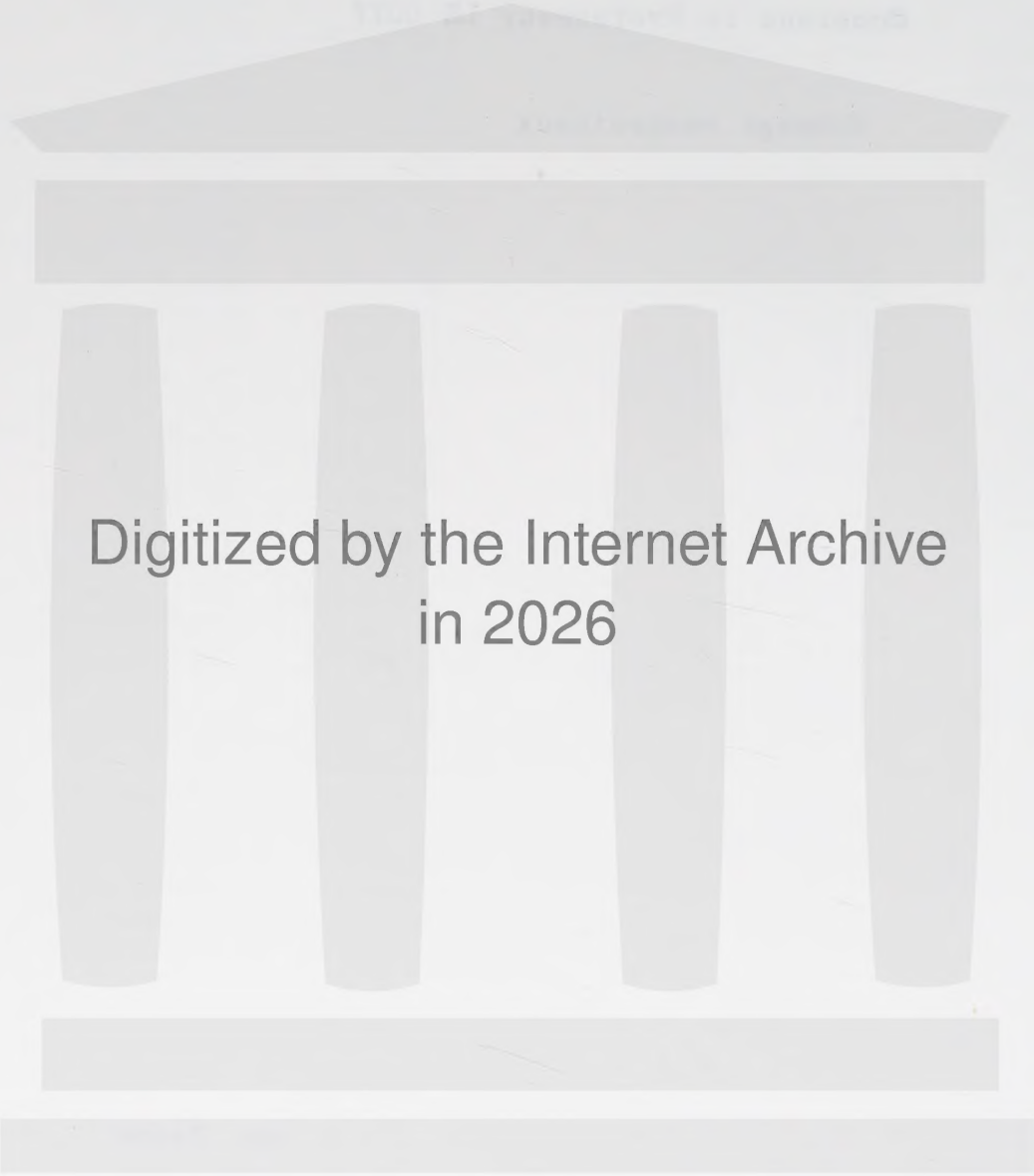
Monsieur le Professeur LE GOFF

Hommage respectueux

A ma Femme

A mes Parents

en témoignage d'affection



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551914_0022

Le présent travail a été effectué sous la direction de Monsieur le Professeur LE GOFF, dans son laboratoire de Génie Chimique de l'E.N.S.I.C. à Nancy. Je suis profondément reconnaissant à mon Maître pour l'intérêt constant qu'il a bien voulu témoigner à mes recherches, et pour les conseils éclairés dont il m'a fait bénéficier. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma gratitude pour la formation que j'ai pu acquérir sous sa bienveillante direction.

Je suis très sensible à l'honneur qu'a bien voulu me faire Monsieur le Professeur GIBERT en acceptant de présider mon jury d'examen, et je l'en remercie bien vivement.

Je remercie également Monsieur le Professeur BASTICK, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, d'avoir bien voulu faire partie de ce jury.

Toute ma gratitude va également au Centre National de la Recherche Scientifique pour l'aide matérielle que j'ai reçue pendant mes recherches.

J'adresse enfin un amical souvenir à toute la sympathique équipe de chercheurs et de techniciens du laboratoire de Génie Chimique.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'ECOULEMENT
D'UNE SUSPENSION DANS UN MILIEU POREUX ET
DU MECANISME DE LA FILTRATION

I n t r o d u c t i o n

La pratique industrielle de la filtration et les travaux scientifiques antérieurs sur cette "opération unitaire" ont révélé l'importance du phénomène de colmatage de l'élément filtrant qui résulte du blocage des pores par les grains les plus fins de la suspension à filtrer.

Dans le but de déterminer le mécanisme d'un tel blocage, nous avons étudié les circonstances de la rétention mécanique des particules d'une suspension s'écoulant à travers des milieux poreux de texture connue, et essayé d'en déduire l'influence des principaux paramètres sur cette rétention.

Le présent mémoire est consacré à l'exposé des résultats obtenus dans l'étude de cette rétention mécanique; il comprend cinq parties :

— Dans un premier chapitre, nous présentons une analyse succincte des processus élémentaires de la rétention des particules dans une filtration.

— Le deuxième chapitre est une revue des principaux travaux scientifiques dans ce domaine.

— Dans le troisième chapitre, nous exposons notre méthode expérimentale et les différents modèles pour représenter la rétention des grains dans un milieu filtrant.

— Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la rétention de microsphères dans un réseau de cylindres et de l'influence de la sédimentation sur cette rétention.

— Dans le cinquième chapitre, nous présentons une étude sur la rétention des microsphères d'une suspension s'écoulant à débit constant à travers un empilement de sphères. Nous avons complété ce dernier travail par la présentation d'un modèle géométrique permettant d'interpréter nos résultats.

Chapitre I

Processus élémentaires de la filtration

Pour comprendre le détail du mécanisme de la filtration d'une suspension, soit par arrêt des particules par une membrane filtrante, soit par rétention de ces particules au sein d'un matériau poreux, nous devons répondre aux trois questions suivantes :

1) Quels sont les sites de rétention disponibles pour les particules en suspension et quelles sont les forces susceptibles de les y maintenir ?

2) Par quels processus les particules de la suspension ont-elles été transportées du sein du fluide en écoulement jusqu'aux sites de rétention ?

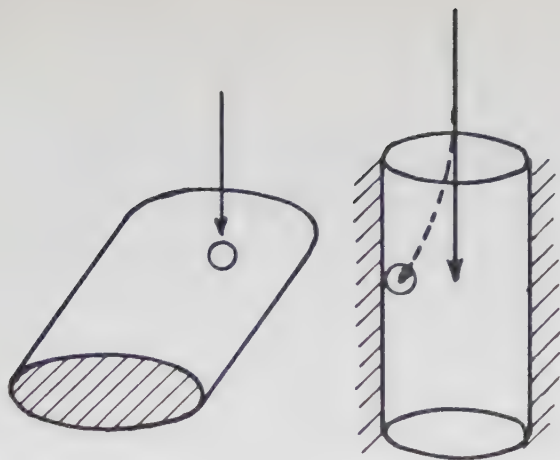
3) Par quels processus des particules préalablement captées dans des sites peuvent-elles être réentraînées par la phase mobile ?

Examinons successivement chacune de ces trois questions.

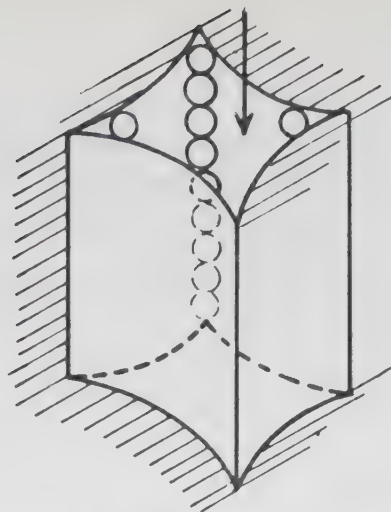
1.1. Description des sites de rétention.

Nous distinguerons quatre types principaux de sites de rétention, que nous avons schématisés sur la figure n° 1.

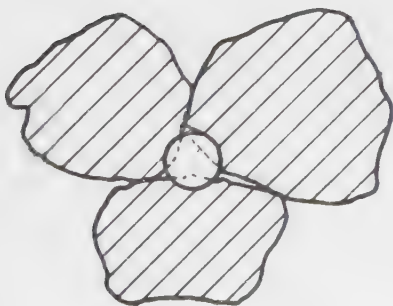
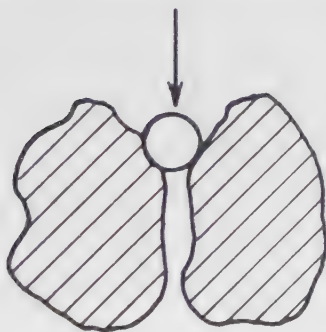
Type I. Sites de Surface. - Ce sont, soit des surfaces convexes comme dans la filtration par un écheveau de fibres textiles, soit des surfaces concaves comme la paroi latérale d'un pore cylindrique. Une particule convexe de petite



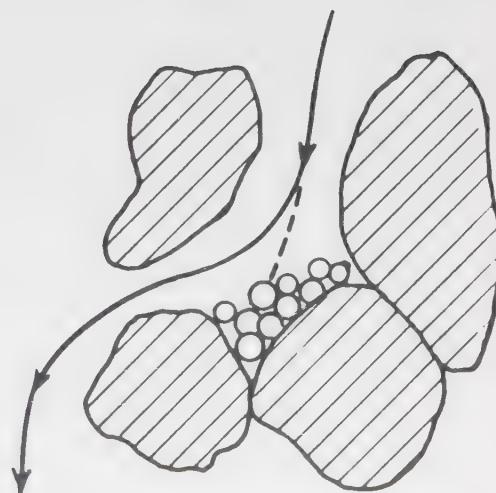
Type I Sites de surface



Type II Sites de crevasse



Type III Sites de retreint



Type IV Sites de caverne

SITES DE RETENTION

dimension n'a qu'un seul point de contact avec un tel site; il en résulte que les seules forces susceptibles de la retenir sont soit d'origine électrostatique, soit les forces d'attraction de Van der Waals. Lorsque la surface est orientée normalement à la direction d'écoulement de la suspension, la pression cinétique peut appliquer la particule contre cette surface et contribuer ainsi à sa rétention.

Type II. Sites de Crevasses. - Ils se trouvent au voisinage de la ligne de contact entre deux surfaces convexes. En plus des forces d'adhérence renforcées du fait qu'il y a dans ce cas deux points de contact, une particule peut être retenue par coinçage mécanique dans la crevasse. Ce coinçage implique deux conditions : d'une part, une certaine élasticité du matériau constituant la particule, d'autre part, une énergie cinétique suffisante de cette particule lorsqu'elle vient en contact avec la crevasse. L'orientation de la crevasse par rapport à la direction d'écoulement du fluide est un facteur important pour l'étude de la rétention dans ces sites.

Type III. Sites de rétreints. - Ces sites sont placés en amont d'un rétrécissement de pore dont la dimension est inférieure à celle des particules de la suspension. Le plus fréquent des sites de ce type est le retreint-triangulaire formé par trois grains convexes en contact. Les particules sont maintenues dans ces sites essentiellement par la pression cinétique du fluide. Les forces de coinçage et d'adhérence interviennent également, et les dernières avec une intensité accrue, puisqu'il y a généralement trois points de contact.

Type IV. Sites de Cavernes. - Ils sont globalement de forme concave et se trouvent généralement dans les coudes de pore. Le fluide qui s'y trouve ne participe pas à l'écoulement général de la suspension; il est, soit immobile, soit plus fréquemment sous forme de tourbillons. Les forces de rétention des particules sont les mêmes que pour les sites de retreints.

1.2. Processus de capture des particules.

La capture des particules qui entraîne le colmatage du milieu filtrant, nécessite dans une première phase le transport de ces particules depuis le sein de la phase mobile jusqu'à un site de rétention. Ce transport peut s'effectuer suivant quatre processus différents :

— Par interception directe des particules qui suivent exactement les lignes de courant du fluide mais qui, ne pouvant se déformer comme le fluide, sont arrêtées soit par les crevasses, soit par les rétreints.

— Par projection des particules vers une paroi, soit sous l'action de la force de pesanteur, soit à cause de leur inertie lors des changements de direction des lignes de courant du fluide. Cet effet est généralement faible pour la filtration des particules en suspension dans un liquide. Il s'annule lorsque les particules ont rigoureusement la même masse volumique que le fluide.

— Par diffusion résultant du mouvement brownien des particules dans le fluide. Ce processus n'est valable que pour les particules dont la dimension est inférieure au micron.

— Par entraînement par les tourbillons au sein du fluide se trouvant au voisinage et dans les cavernes latérales.

Le transport vers le site de rétention ayant été réalisé par l'un de ces processus, la rétention proprement dite est assurée par les forces que nous avons décrites au paragraphe précédent.

1.3. Processus de réentraînement des particules.

Le réentraînement des particules préalablement captées assure le décolmatage du milieu poreux; il peut se produire soit spontanément, les variables opératoires (débit, pression) restant invariantes, soit être provoqué par la modification de l'une de ces variables.

— Le réentraînement spontané peut avoir deux causes différentes :

Soit les fluctuations locales du débit ou de la pression entraînant une modification temporaire de la pression cinétique que le fluide exerce sur les particules fixes.

. Soit par chocs des particules en mouvement sur ces particules fixes.

L'éventualité d'un tel événement dépendra naturellement du type de site de rétention et de la force liant la particule au milieu poreux; vraisemblablement, les sites de surface seront plus aisément décolmatables que les sites de crevasse et a fortiori que les sites de rétreint.

— Le réentraînement peut, d'autre part, être provoqué :

. Soit par augmentation de la pression ou du débit de la suspension.

. Soit en inversant le sens de son écoulement.

Les différents sites de rétention ne seront pas également sensibles au décolmatage par l'un ou l'autre de ces deux modes opératoires.

Nous avons résumé, dans le tableau n° 1, les différents événements pouvant se produire lorsqu'une particule traverse un milieu filtrant.

Tableau n° 1

Modes de <u>capture</u> d'une particule mobile - <u>Colmatage</u>	Modes de <u>rétention</u>	Modes de <u>réentraînement</u> d'une particule fixe - <u>Décolmatage</u>
-Interception directe	-Adhérence sur une surface	-Réentraînement spontané .Fluctuations locales de débit et de pression
-Inertie	-Coinçage dans une crevasse	.Chocs entre particules
-Pesanteur		
-Diffusion moléculaire	-Blocage dans un rétreint	-Réentraînement provoqué .Augmentation de la pres- sion ou du débit
-Diffusion turbulente	-Remplissage d'une caverne	.Inversion du sens d'é- coulement

Avant d'entreprendre l'étude sur modèle de certains de ces processus élémentaires, examinons les différents travaux théoriques réalisés sur la rétention de particules dans un milieu filtrant.

Chapitre II

Travaux antérieurs sur le colmatage

Les études fondamentales sur le colmatage d'un milieu filtrant ont généralement été entreprises en vue d'une application directe à la purification des eaux. Les chercheurs ont utilisé à cet effet des filtres de grande épaisseur (de l'ordre d'un mètre) et ont essentiellement porté leur attention sur la pénétration des particules à l'intérieur du milieu filtrant en vue de pouvoir contrôler la qualité de l'effluent.

Nous envisagerons la revue de ces différents travaux sous trois aspects différents :

- 1) Etude de la cinétique de la rétention des particules lors de l'écoulement d'une suspension à travers un milieu poreux.
- 2) Etude des forces agissant sur les particules en suspension et dans les sites de rétention.
- 3) Etude de l'évolution de la géométrie du milieu filtrant en cours de colmatage.

2.1. Aspect Cinétique.

Dans cette revue, nous ne retiendrons que les études faites à débit constant; le régime d'écoulement de la suspension est en général laminaire.

La loi fondamentale, pour l'étude de la cinétique du colmatage donne la variation de la concentration y de la suspension en fonction de la profondeur z de pénétration à l'intérieur du milieu filtrant. Deux expressions ont été proposées pour représenter cette loi :

a) La forme la plus fréquemment admise conduit à l'équation suivante :

$$- \frac{\partial y}{\partial z} = k'.y (z) \quad (1)$$

k' est un coefficient variable avec la quantité de particules retenue dans le milieu filtrant.

b) La deuxième expression de cette loi est donnée par l'équation :

$$- \frac{\partial y}{\partial z} = k'.y (z) - a'. X (z) \quad (1)'$$

dans laquelle k' est constant au cours de la filtration et $X (z)$ la concentration volumique en particules dans le volume poreux de l'élément filtrant. Par combinaison de l'équation donnant le bilan de matière dans l'élément de surface unitaire et de hauteur dz :

$$- u \, dt. \, dy = dz. \, d X \quad (2)$$

u vitesse d'écoulement du fluide dans le garnissage avec les équations (1) et (1)', nous obtenons aisément la vitesse de variation de la concentration en particules :

$$\frac{\partial}{\partial t} [X (z)] = k.y (z) \quad (3)$$

$$\text{ou } \frac{\partial}{\partial t} [X (z)] = k.y (z) - a. X (z) \quad (3)'$$

k est le coefficient de filtration variable dans l'équation (3) et constant dans l'équation (3)'.

Examinons, à travers les travaux des différents auteurs, ces deux hypothèses possibles pour la cinétique de la rétention des particules.

- 1ère Hypothèse : Coefficient de filtration variable.

En 1937, IWASAKI¹ proposa, pour la première fois, une équation du type (1). Il admit une augmentation linéaire du coefficient de filtration en fonction de la

concentration dans le filtre :

$$k = k_0 + b.X \quad (4)$$

En 1940, STEIN² reprit cette hypothèse qui semble en contradiction avec les expériences de nombreux chercheurs ayant constaté une diminution de l'efficacité du milieu filtrant lorsque la quantité de particules retenues augmente.

En 1955, SHEKTMAN³ fit l'hypothèse d'une diminution linéaire du coefficient de filtration avec la concentration en particules dans le filtre :

$$k = k_0 - b.X \quad (5)$$

En 1960, IVES⁴ admit que, dans un premier stade, par suite d'une augmentation de la surface spécifique disponible pour le dépôt des particules, il y avait une augmentation linéaire du coefficient k en fonction de la concentration X ; dans un deuxième stade, l'accroissement de la vitesse interstitielle de la suspension dans le milieu poreux et l'apparition d'une diminution de la surface spécifique entraînent un abaissement du coefficient de filtration proportionnel à X^2 .

Ces deux actions antagonistes conduisent à l'expression suivante :

$$k = k_0 + b.X - c.X^2 \quad (6)$$

Cette hypothèse d'une variation parabolique du coefficient de filtration est confirmée expérimentalement par l'existence d'un point d'inflexion dans les courbes représentant la concentration X en fonction du temps.

LING⁵ et ELLIASSEN⁶ ont aussi obtenu des courbes expérimentales où la vitesse de variation de la concentration X passe par un maximum pour finalement s'annuler.

Cependant, IVES⁷ a montré que, dans la plupart des cas, il était parfaitement légitime de négliger l'accroissement initial de l'efficacité de la filtration, donc le deuxième terme $b.X$ de l'équation (6).

En 1960, MACKRLE⁸ explicite la relation donnant le coefficient k' en fonction des caractéristiques physiques du milieu filtrant :

$$k' = \frac{6 (1 - \varepsilon) \cdot dl}{\varepsilon \cdot \psi \cdot D \cdot dz} \quad (7)$$

ψ facteur de forme des grains de dimension D constituant le milieu filtrant.

dl épaisseur d'une couche, à la surface des grains, dans laquelle il y a adhérence des particules.

Ces caractéristiques évoluant au cours du colmatage, il s'en suit une variation du coefficient de filtration de la forme :

$$k = k_0 (1 - b.X)^j \quad (8)$$

MACKRLE a déterminé la valeur de l'exposant j à partir de la mesure expérimentale de la perte de charge. Il trouve $j = 1,2$.

En 1957, HALL⁹ utilisa l'hypothèse fondamentale représentée par l'équation (1) et explicite la forme du coefficient k' pour deux mécanismes de colmatage que nous exposerons aux paragraphes 22 et 23.

En 1964, MAROUDAS¹⁰ proposa pour représenter l'évolution du coefficient k' une expression de la forme :

$$k'_{z,t} = K_1 \left[\frac{1}{u_{z,t}} - \frac{1}{u_c} \right] \quad (9)$$

dans laquelle K_1 est une constante pour un milieu poreux et une suspension donnés, $u_{z,t}$ est la vitesse interstitielle dans le milieu poreux et u_c est une vitesse interstitielle critique au-delà de laquelle il ne peut plus y avoir de dépôt des particules dans le milieu filtrant.

- 2ème Hypothèse : Coefficient de filtration constant.

La deuxième tendance, selon laquelle la diminution de l'efficacité de la filtration est due à l'apparition d'un

processus de réentraînement des particules préalablement captées, tandis que le coefficient de filtration reste constant, est essentiellement représentée par MINTS¹¹ et ¹². Pour ce chercheur, la cinétique du colmatage obéit à une loi du type (3)'.

De cette analyse, il ressort que tous les chercheurs sont d'accord pour admettre que la vitesse de capture des particules est proportionnelle à leur concentration, la divergence n'intervenant que dans le mécanisme expliquant la diminution de l'efficacité du milieu filtrant. Les deux mécanismes proposés ne sont d'ailleurs pas contradictoires; ce sont deux états limites d'un même phénomène. En effet, dire que le coefficient de filtration k diminue lorsque la concentration X augmente, signifie qu'une particule a une probabilité moins grande d'être retenue quand elle pénètre dans un "site de rétention" déjà occupé par d'autres particules; or, il revient au même de dire que la particule a toujours la même probabilité d'être captée dans le site de rétention, mais que la probabilité de réentraînement est d'autant plus grande que la concentration X est plus élevée. La seule différence entre les deux mécanismes est que le temps de séjour des particules dans le site de rétention est infiniment court dans le 1er cas.

22 - Aspect énergétique.

Cet aspect du colmatage a trait à l'étude des forces susceptibles d'intervenir dans la capture ou le réentraînement des particules à l'intérieur du milieu filtrant. Ces forces peuvent se classer en trois catégories :

- Les forces d'origine hydrodynamique,
- Les forces d'interaction entre particules,
- Les forces de rétention mécanique.

A - Les forces d'origine hydrodynamique.

Les études ayant généralement été faites en régime d'écoulement laminaire, les forces de frottement visqueux sont prépondérantes.

Toutefois, comme le fait remarquer IVES¹³ il est nécessaire de faire intervenir d'autres forces pour détourner les particules des lignes de courant du fluide vers la surface des grains constituant le milieu filtrant. Parmi celles-ci, la force due à la combinaison de l'action de la pesanteur et de la poussée d'Archimède, a retenu l'attention de nombreux chercheurs, notamment IVES⁴, STEIN², HALL⁹, SHEKTMAN³ et MAROUDAS¹⁴. L'effet de cette force sur le colmatage dépend, d'une part, de la divergence entre les vecteurs représentant la vitesse de sédimentation $\vec{v}_s$ et la vitesse $\vec{u}$ du fluide, d'autre part, du rapport entre les intensités de ces vecteurs.

STEIN² et IVES⁴ ont vérifié expérimentalement que les dépôts de particules étaient localisés dans les coudes de pores aux endroits où les vecteurs $\vec{v}_s$ et $\vec{u}$ divergeaient le plus. En réalité, cet effet d'inertie est surtout très sensible dans le cas de particules en suspension dans l'air traversant un milieu poreux où les lignes de courant du fluide ont un faible rayon de courbure. Une analyse assez complète en est donnée par WHITE et SMITH¹⁵ dans leur livre "High Efficiency Air Filtration".

D'autre part, HALL⁹ admet que le coefficient k' dans l'équation de base (1) est proportionnel au rapport $\frac{v_s}{u}$.

Pour certains chercheurs, comme MACKRLE⁸ et HAUPT¹⁶, l'apparition de la turbulence dans le milieu filtrant favoriserait le transport des particules vers la surface du matériau constituant le filtre, donc le colmatage. Il semble que ces

chercheurs n'aient vu qu'un aspect de l'action de la turbulence, en négligeant la possibilité de réentraînement des particules par les forces de turbulence.

B - Les forces d'interaction entre particules.

Ces forces d'interaction entre une particule et la paroi du matériau filtrant sont, soit les forces de Van der Waals, soit les forces électrostatiques. Elles ne deviennent réellement opérationnelles que lorsque la distance entre particules est faible (environ une centaine d'Angströms pour les forces de Van der Waals) et ne sont donc efficaces que dans la filtration de suspensions colloïdales ou d'aérosols. Les études sur ce sujet étant très nombreuses et n'ayant qu'un faible rapport avec notre travail, nous n'en ferons pas l'analyse bibliographique. Des chercheurs ayant fait des travaux semblables aux nôtres, seuls MINTS¹¹ et 12 et MACKRLE⁸ ont utilisé des particules assez fines pour être soumises à une telle adsorption physique de la part du milieu filtrant. MACKRLE fait d'ailleurs intervenir les forces de Van der Waals dans son mécanisme de rétention.

C - Les forces de rétention mécanique.

Ces forces prennent naissance lors de l'arrêt d'une particule, soit dans un site de rétreint, soit dans un site de crevasse. Elles dépendent essentiellement du rapport de la dimension d des particules à la dimension D des grains constituant le lit filtrant.

HALL⁹ admet que la rétention mécanique s'effectue près de la surface de contact entre deux grains dans un site de crevasse, et que le coefficient k' dans la relation fondamentale (1) est de la forme :

$$k' = 35.P. \left(\frac{d}{D} \right)^{3/2} \quad (10) \quad P \text{ est un coefficient numérique.}$$

Pour des lits filtrants formés de grains d'une dimension de l'ordre du millimètre, les forces d'origine mécanique ne deviennent importantes que pour des particules d'au moins plusieurs dizaines de microns.

L'importance relative de ces différents types de forces dépend essentiellement de la taille et de la nature des particules à filtrer. Elle est en outre susceptible d'évoluer au cours du colmatage, soit à cause du changement des caractéristiques physiques du lit filtrant, soit par suite de l'évolution des conditions hydrodynamiques, notamment l'accroissement de la vitesse interstitielle du fluide dû à la réduction de l'espace disponible pour l'écoulement de la suspension.

23 - Aspect Géométrique.

L'étude des sites de rétention pour les grains et de la manière dont ils se disposent dans ces sites, est essentielle pour la compréhension du mécanisme global du colmatage.

HERMANS et BREDEE¹⁷ puis KRASOVITSKIY et JUJIKOV¹⁸ ont admis que la rétention s'effectuait sur la paroi latérale des pores, supposés cylindriques, avec réduction constante du diamètre de ces pores sur toute leur longueur. Cette hypothèse conduit à une variation de la surface spécifique du lit filtrant, en fonction de sa porosité ϵ_0 et de la quantité de particules déposées, de la forme :

$$s_g(t) = s_g(0) \cdot \left[1 - \frac{X(t)}{\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (11)$$

En plus du fait que le modèle du faisceau de pores cylindriques n'est qu'une représentation très approximative d'un milieu filtrant granulaire, l'hypothèse d'une diminution uniforme du diamètre de ses pores au cours du colmatage semble très peu vraisemblable pour les milieux filtrants de grande épaisseur.

MACKRLE⁸ améliore cette hypothèse en proposant, pour la représentation de la variation de surface spécifique, l'équation suivante :

$$s_g(t,z) = s_g(0,z) \cdot \left[1 - \frac{X(t,z)}{\varepsilon(0,z)} \right]^f \quad (12)$$

f étant une constante numérique fonction du facteur de forme ψ des grains et de la porosité ε . Dans l'étude expérimentale de MACKRLE, la constante f est égale à 0,9.

En 1962, IVES⁴ admit que la surface spécifique passait par un maximum, l'augmentation initiale étant due à la formation d'un dépôt sur la partie amont des grains du lit filtrant. Puis, en 1965 (réf.19), en se basant sur le modèle de KOZENY, mais en admettant que les pores sont tortueux et de rayon variable, il proposa la relation suivante :

$$s_g = (s_g)_0 \cdot \left[1 - \frac{X}{\beta} \right]^q \quad (13)$$

β étant un coefficient caractérisant la compacité de l'empilement des particules dans les sites de rétention et q une constante.

GHOSH²⁰ supposa, au contraire, qu'en première approximation, la surface spécifique restait constante lors du colmatage.

Si cette notion de surface spécifique est très importante dans le cas où il y a possibilité d'action des forces superficielles (Van der Waals et électrostatiques), elle l'est beaucoup moins lorsqu'il y a rétention par les forces mécaniques.

Le mécanisme de rétention mécanique proposé par HALL⁹ est basé sur la capture des particules dans les angles d'un rétrécissement de pore formé par trois sphères tangentes deux à deux. Une telle rétention dans des sites de crevasse a aussi été signalée par STEIN² et SHEKTMAN³.

HEERTJES²¹ distingue trois mécanismes principaux pour la rétention des particules:

- Obstruction complète d'un pore par une particule de dimension supérieure à celle du pore.
- Obstruction complète avec formation de "ponts" par des particules plus petites que le diamètre du pore, mais arrivant simultanément sur la partie amont du pore.
- Obstruction partielle des pores avec réduction uniforme du diamètre de ces pores.

HAUPT¹⁶ a mis l'accent sur un autre élément important pour l'efficacité d'un milieu filtrant, la rugosité de la surface des grains constituant ce milieu.

Ces multiples aspects du colmatage rendent l'étude de ce phénomène assez complexe. Dans toutes les études rencontrées, cette complexité est accrue par l'utilisation de filtre de grande épaisseur, dont les caractéristiques n'évoluent pas de façon homogène sur toute la profondeur du milieu filtrant en cours de colmatage. Cette hétérogénéité est encore accrue par l'addition de coagulants chimiques, notamment dans les études de MACKRLE⁸ et ELIASSEN⁶, qui superpose au phénomène de colmatage un effet de floculation.

Pour simplifier l'étude du colmatage, il apparaît donc nécessaire d'éliminer cette hétérogénéité en utilisant un élément filtrant de faible hauteur et en réduisant au maximum le nombre des forces susceptibles d'agir sur une particule lors de sa traversée du milieu poreux. C'est ce que nous avons réalisé dans l'étude sur modèles des processus "mécaniques" de colmatage et de décolmatage.

C h a p i t r e III

Etude sur modèles des processus "mécaniques" de colmatage et de décolmatage Méthode expérimentale et grandeurs caractéristiques

3.1. Introduction.

Dans la conception de nos modèles de filtration, nous avons eu essentiellement deux préoccupations:

- d'une part, la limitation du nombre des processus de colmatage,
- d'autre part, la réalisation de milieux poreux de texture connue dont la complexité croissante nous permettra d'étudier le colmatage des différents types de sites de rétention.

- Limitation des processus de colmatage.

.Cette limitation s'exerce de deux manières différentes:

a) Limitation du nombre des processus de transport de la particule depuis le sein de la suspension jusqu'aux sites de rétention. Ce transport ne pourra s'effectuer que par interception directe ou diffusion turbulente car nous avons éliminé, d'une part, la diffusion moléculaire par l'emploi de particules de dimension relativement élevée (supérieure à 60 microns), d'autre part, les forces d'inertie et de pesanteur en utilisant un liquide de suspension ayant même masse volumique que les particules.

b) Limitation du nombre des forces de rétention qui se réduisent aux forces mécaniques (coincage, blocage....); les forces d'adhérence étant négligeables à cause de la dimension et la nature des particules employées.

- Texture des modèles.

Deux modèles simples ont été utilisés :

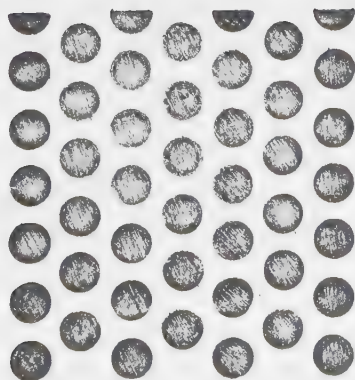
a) Le premier, schématisant un milieu filtrant fibreux, est constitué par un réseau régulier de cylindres de même diamètre ($\phi = 3,3$ mm) dont les axes sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement de la suspension. Trois arrangements de complexité croissante ont été réalisés; ils sont représentés suivant une coupe perpendiculaire aux axes des cylindres sur la figure n° 2. Dans le premier arrangement, les particules ne peuvent se déposer que sur des surfaces, tandis que dans le deuxième elles peuvent se placer, soit sur des surfaces, soit dans des crevasses. Le troisième arrangement rassemble tous les sites de rétention possibles : surfaces, crevasses, cavernes.

b) L'autre modèle, schématisant un milieu filtrant granulaire, est constitué par un empilement de sphères lisses de même diamètre ($D=2$ ou 3 mm). Il contient tous les types de sites de rétention décrits au paragraphe 1.1.

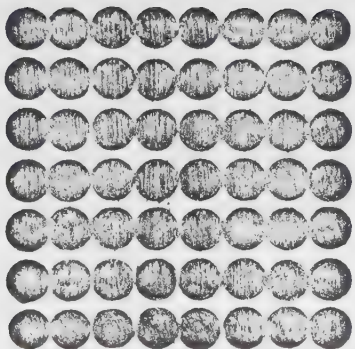
Par ailleurs, les particules que nous avons mises en suspension étant sphériques, il nous sera plus facile de déterminer les différentes actions qu'elles subissent de la part du fluide et du milieu poreux. Nous avons mesuré leur concentration X dans les différents modèles lorsque nous les faisons traverser, à débit constant, soit par une suspension très diluée et de concentration constante y , soit par un liquide de lavage après un colmatage préalable.

La mesure de cette concentration X nous a permis d'analyser les processus "mécaniques" de colmatage et de décolmatage.

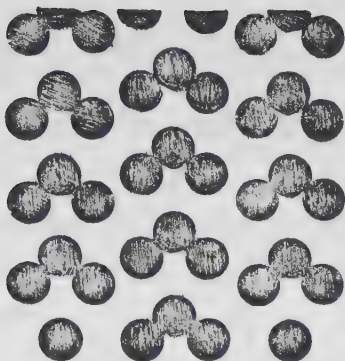
COUPES de RESEAUX de CYLINDRES



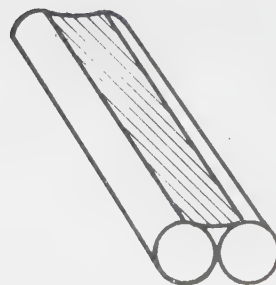
QUINCONCE



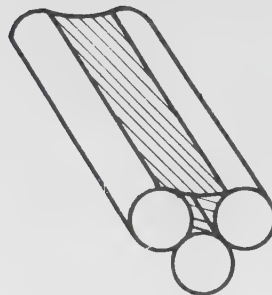
JOINTIF ALIGNE



JOINTIF QUINCONCE



Site de crevasse



Site de caverne

32 - Méthode expérimentale.

3.2.1. - Principe de la méthode - (Voir figure n° 3).

La concentration en particules dans la cellule de filtration est mesurée par une méthode photométrique.

Les particules en polystyrène sulfoné, brunes et opaques à la lumière, sont mises en suspension dans un mélange de benzène et de tétrachloréthylène qui a sensiblement le même indice de réfraction ($n = 1,502$) que les cylindres ou les sphères en verre ($n = 1,52$) constituant le milieu filtrant. En l'absence de particules, ce milieu est transparent; lorsqu'il retient des particules il devient plus ou moins opaque à la lumière. En mesurant l'intensité lumineuse, transmise à travers la cellule de filtration et moyennant un étalonnage préalable, nous obtenons la valeur instantanée de la concentration moyenne en particules dans le milieu filtrant.

Une information supplémentaire sur le colmatage de ce milieu nous est donnée par la mesure de la perte de charge subie par la suspension qui le traverse.

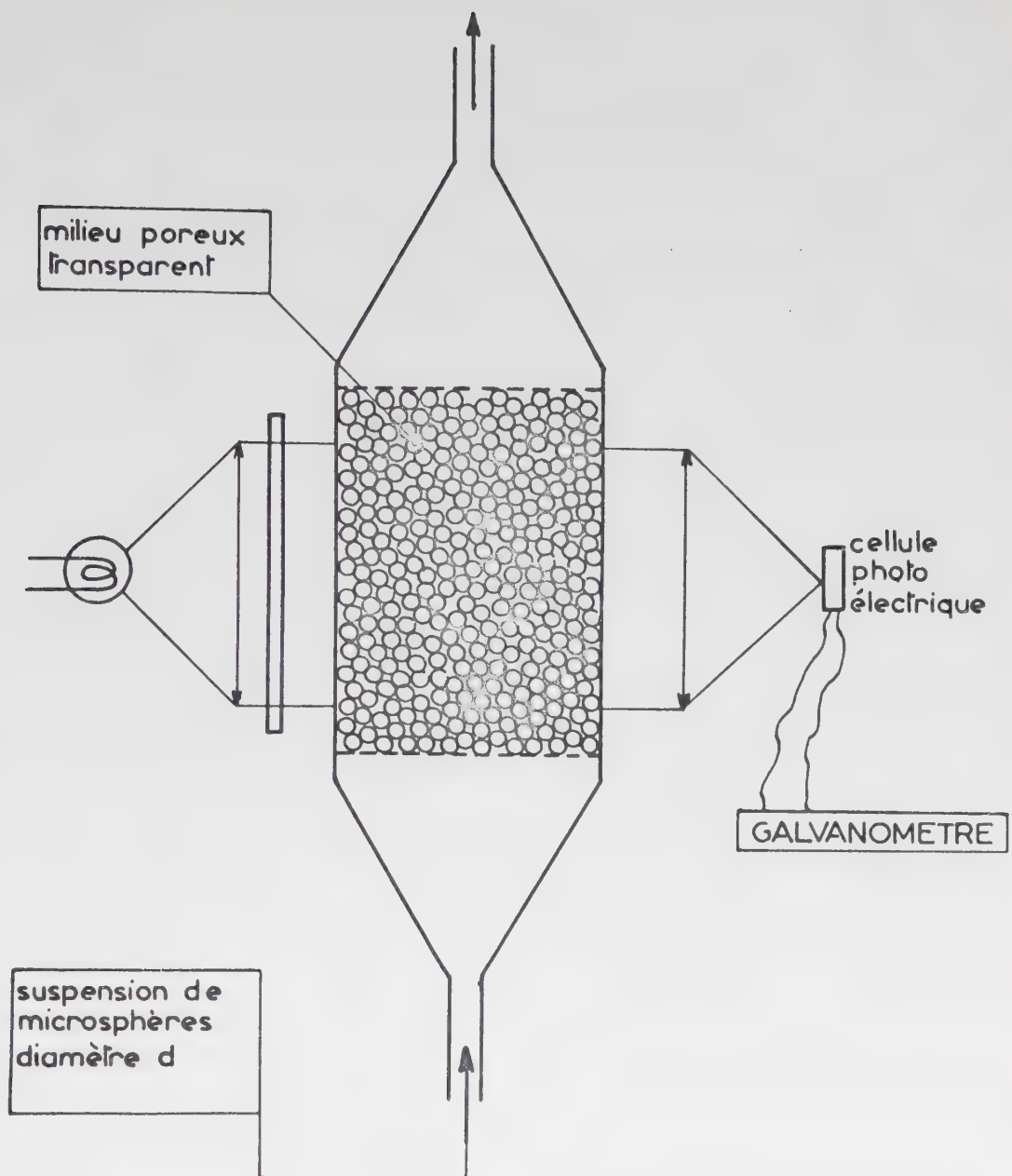
3.2.2. - Dispositifs expérimentaux.

L'appareillage se compose essentiellement de trois parties :

- Le circuit des fluides.
- La cellule contenant le modèle de milieu filtrant.
- Les appareils de mesure.

A. Dispositifs de circulation des fluides.

Deux appareils ont été utilisés : Le premier, conçu pour réaliser les expériences préliminaires et étudier le lavage d'un milieu filtrant partiellement colmaté, assure une circulation discontinue de suspension et continue de liquide pur. Le deuxième réalisant une circulation continue de suspension nous a permis une étude approfondie de la rétention des particules dans l'empilement de sphères.



PRINCIPE du MONTAGE EXPERIMENTAL
CELLULE de MESURE

- Appareil à circulation discontinue de suspension.

Cet appareil est schématisé sur la figure n° 4; il est composé de deux circuits ayant une partie commune au voisinage de la cellule de filtration.

Le premier circuit permet d'écouler à pression constante la suspension réalisée dans un récipient, d'une capacité de huit litres, muni d'une agitation.

Le deuxième circuit permet d'obtenir une gamme de débits constants de liquide pur allant de 0,4 à 9 litres par minute.

La tuyauterie de la partie commune aux deux circuits est conçue de manière à pouvoir réaliser un écoulement, soit ascendant, soit descendant de la suspension ou du liquide pur à travers le milieu filtrant.

- Appareil à circulation continue de suspension.

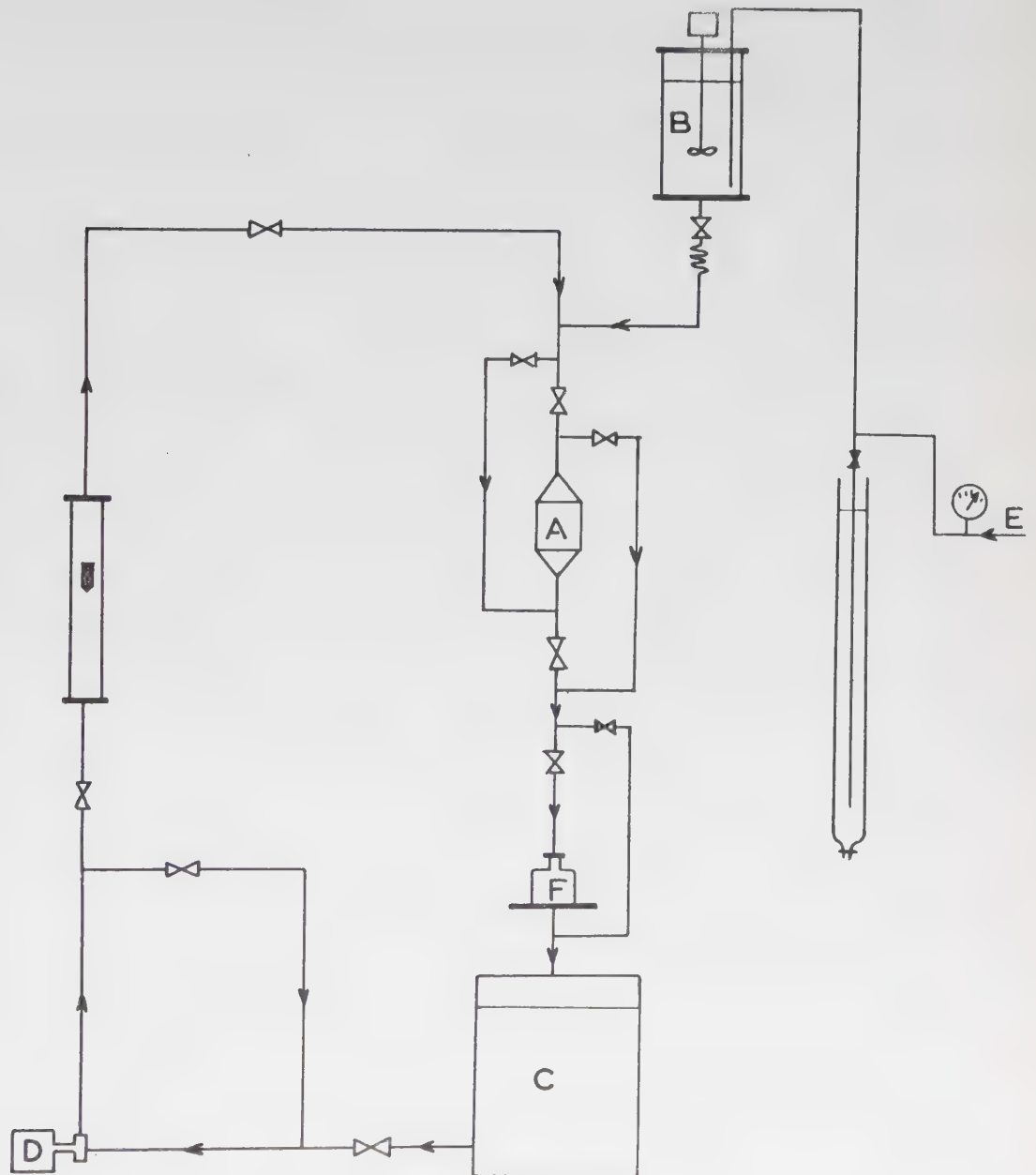
L'appareil est schématisé sur la figure n° 5. La suspension est réalisée dans un fût en acier inoxydable d'une contenance d'environ cent litres. Cette capacité a été retenue afin de pouvoir considérer comme négligeable la quantité de particules captées par le milieu filtrant vis-à-vis de celle contenue dans le volume total de suspension. Dans ces conditions, la concentration de la suspension reste pratiquement constante. Son homogénéité est assurée par un agitateur tournant à 300 tours par minute.

La circulation de cette suspension est réalisée à l'aide d'une pompe centrifuge actionnée par un moteur ayant deux vitesses de rotation : 1.500 et 3.000 tours par minute. Un "by-pass" et une batterie de trois robinets en parallèle permettent d'obtenir une gamme de débits s'étageant de 0,45 à 9,1 litres par minute.

B. Cellules de filtration.

Nous avons réalisé deux cellules de filtration; l'une contenant les réseaux de cylindres, l'autre l'empilement de sphères.

APPAREIL à ALIMENTATION DISCONTINUE de SUSPENSION



A_ Cellule de filtration

B_ Réservoir de suspension

C_ Réservoir de liquide pur

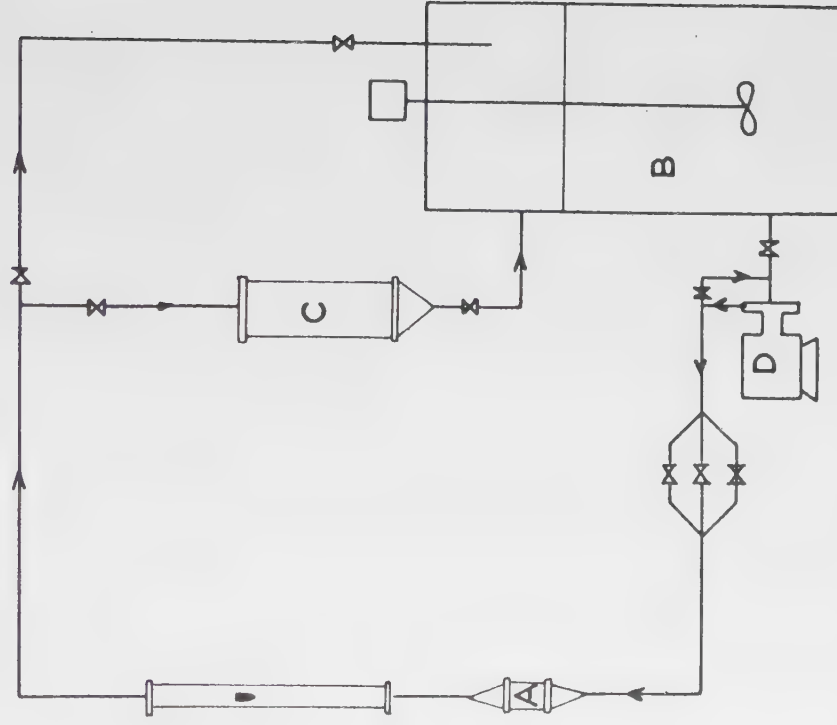
D_ Pompe de circulation du liquide pur

E_ Air comprimé

F_ Membrane filtrante

Fig 4

APPAREIL à ALIMENTATION CONTINUE de SUSPENSION



A - cellule de filtration

C - récipient gradué

B - réservoir de suspension

D - pompe de circulation de la suspension

Fig 5

- Cellule contenant le réseau de cylindres - (figure n°6)

Cette cellule, réalisée en duralumin, contient les cylindres de verre dont les extrémités sont fixées dans des plaques percées de trous circulaires disposés suivant les divers arrangements présentés sur la figure n° 2. Les axes de ces cylindres sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement de la suspension.

Deux fenêtres circulaires, en verre, de 3 centimètres de diamètre, permettent à un faisceau lumineux cylindrique de traverser la cellule perpendiculairement aux axes des cylindres et à la direction de l'écoulement de la suspension.

Le corps de la cellule est muni de deux prises de pression situées l'une en amont, l'autre en aval du réseau de cylindres qui a une hauteur totale de 5 cm.

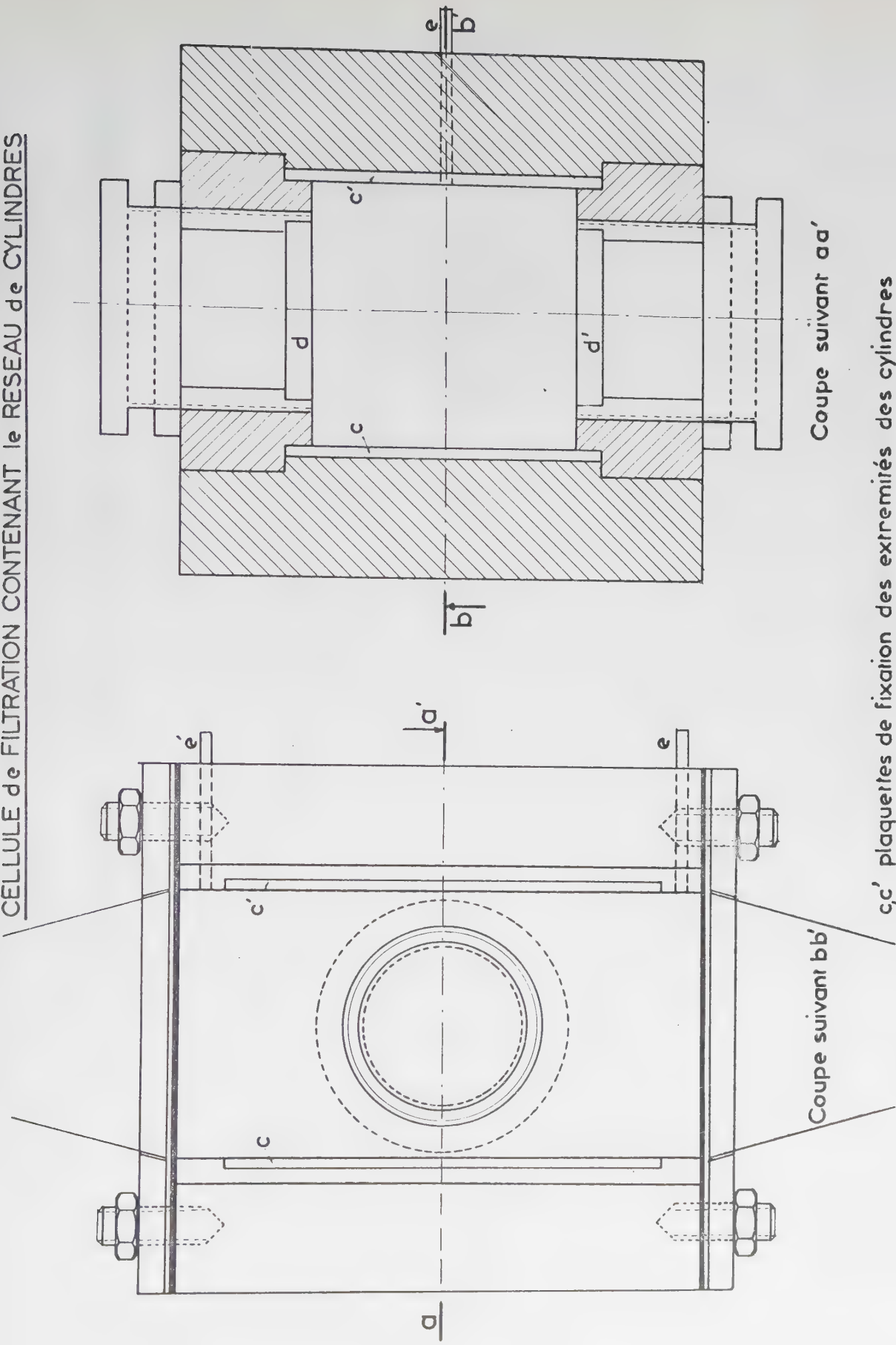
La section S disponible pour l'écoulement de la suspension étant un carré de 5 cm de côté, la cellule est reliée au circuit général par l'intermédiaire de troncs de pyramide à base carrée.

- Cellule contenant l'empilement de sphères - (figure n°7)

Elle est constituée d'un cylindre de verre (hauteur 7 cm, diamètre intérieur 4,6 cm, épaisseur 0,5 cm) à l'intérieur duquel se trouve le garnissage de sphères. Celui-ci est supporté par une grille en laiton dont l'ouverture de maille est grande vis-à-vis des pores du milieu filtrant afin de ne pas perturber l'écoulement de la suspension.

Le garnissage est aussi comprimé à sa partie supérieure par une grille identique à la précédente. Sa hauteur totale est $Z = 6,2$ cm.

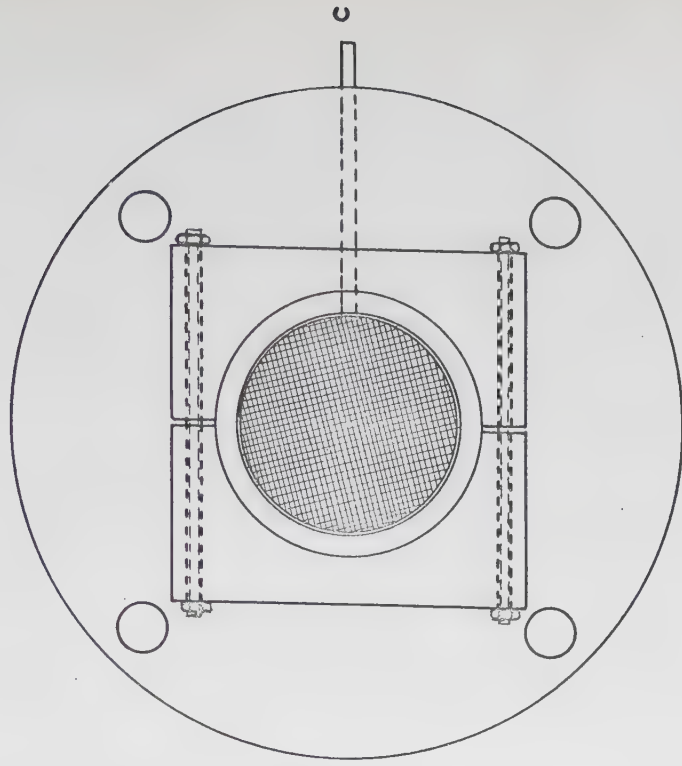
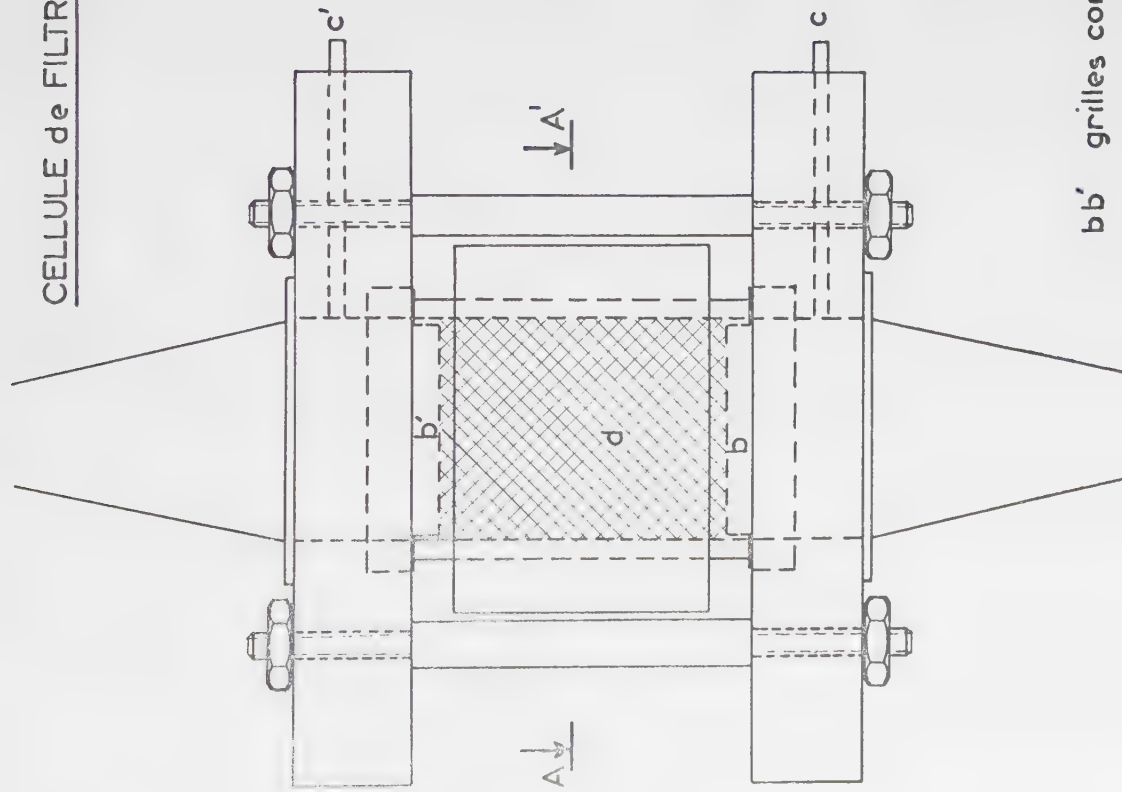
Le diamètre intérieur du cylindre de verre a été choisi suffisamment grand pour que le rapport de ce diamètre au diamètre D des sphères constituant le garnissage soit toujours supérieur à 15. On peut, dans ces conditions, négliger les effets de la paroi sur le milieu filtrant.



cc' plaquettes de fixation des extrémités des cylindres
 dd' lucarnes circulaires délimitant le faisceau lumineux
 ee' prises de pression

Fig 6

CELLULE de FILTRATION CONTENANT L'EMPILEMENT de SPHERES



Coupe AA'

bb' grilles comprimant l'empilement des sphères

cc' prises de pression

d empilement de sphères

Fig 7

Deux demi-coquilles en métacrylate de méthyle (indice de réfraction 1,49), dont l'une des surfaces est plane et l'autre vient s'ajuster sur la paroi extérieure du cylindre de verre, complètent le corps de la cellule de filtration. Cette gaine de métacrylate de méthyle permet d'obtenir, à partir d'un faisceau lumineux incident cylindrique, un faisceau émergent de la cellule qui est également cylindrique.

Le corps de la cellule est compris entre deux brides, munies de prises de pression, et raccordées au circuit général par l'intermédiaire de troncs de cône de faible angle d'ouverture (de l'ordre de 25 degrés) afin d'obtenir un écoulement homogène de la suspension à travers le milieu filtrant.

C. Les appareils de mesure.

- Mesure photométrique.

Le faisceau lumineux cylindrique est produit par un projecteur de diapositives d'une puissance de 300 watts alimenté par l'intermédiaire d'un régulateur de tension. Le diamètre de ce faisceau est assez grand (environ 3 cm pour le réseau de cylindres, et 4 cm pour l'empilement de sphères) afin d'obtenir la concentration moyenne en microsphères dans toute la cellule de filtration.

Une série de filtres permet d'obtenir un flux lumineux incident plus ou moins intense. Le faisceau émergent est recueilli par une lentille au foyer de laquelle se trouve une cellule photoélectrique à couche d'arrêt, reliée à un galvanomètre.

- Mesure de la perte de charge.

La perte de charge subie par le fluide à sa traversée du milieu filtrant est obtenue en reliant les prises de pression de la cellule de filtration à un manomètre différentiel.

Les prises de pression sont munies de filtres afin d'éviter la pénétration des microsphères dans le manomètre.

- Mesure des débits.

L'utilisation d'un rotamètre ayant été éliminée, par suite du blocage du flotteur par les microsphères, nous avons mesuré le débit de suspension par chronométrage, en repérant le volume débité dans un récipient gradué, intercalé dans le circuit de suspension.

Dans l'appareil à alimentation discontinue de suspension, le débit de liquide pur est repéré à l'aide d'un rotamètre ayant un flotteur en téflon.

3.2.3. - Caractéristiques des matériaux employés.

A. Liquide de suspension.

Les caractéristiques physiques des éléments constituant le liquide de suspension sont à la température de 20°C:

Liquide \ Propriété Physique	Indice de réfraction	Masse Volumique en g/cm ³	Viscosité en prise
Benzène	1,505	0,879	0,65.10 ⁻²
Tétrachloréthylène	1,501	1,623	0,91.10 ⁻²

Nous avons utilisé un mélange constitué d'environ un volume de benzène pour deux volumes de tétrachloréthylène. Sa masse volumique était $\rho_1 = 1,38 \text{ g/cm}^3$ et son indice de réfraction 1,502.

La viscosité dynamique η_c de ce mélange, mesurée à l'aide d'un tube viscosimétrique, est égale à 0,84 centipoise à 20°C.

La viscosité dynamique η de la suspension est donnée

par la relation d'Einstein :

$$\eta = \eta_c (1 + 2,5 y) \quad (14)$$

Etant donné que la concentration volumique y des suspensions utilisées était toujours très faible, la viscosité η est très peu différente de celle η_c du liquide.

B. Matériau en suspension.

Nous avons utilisé des particules sphériques, en polystyrène sulfoné de coloration brune foncée, dont la masse volumique ρ_s , mesurée au picnomètre, est égale à $1,38 \text{ g/cm}^3$.

Ces microsphères, dont le diamètre variait de 60 à 350 microns, ont été calibrées par tamisage. Une analyse granulométrique a été faite au microscope pour les différentes fractions; les résultats en sont précisés dans la présentation des données expérimentales.

Les microsphères sont parfaitement mouillées par le mélange benzène-tétrachloréthylène; nous n'avons décelé aucune altération ni gonflement de ces microsphères dans le liquide de suspension.

C. Matériaux constituant le milieu filtrant.

Les cylindres et les sphères ayant servi de garnissage dans la cellule de filtration, sont en "verre blanc durci" d'indice de réfraction environ 1,52.

Afin de déterminer leur diamètre moyen et l'écart type correspondant, nous avons effectué des mesures au pied à coulisse sur différents échantillons. Les résultats obtenus sont les suivants :

Pour les cylindres; diamètre moyen $\Phi_m = 3,29 \text{ mm.}$
 écart type $\sigma = 0,035 \text{ mm.}$

Pour les sphères;	diamètre moyen D_m en mm	Ecart type σ en mm
Lot n° 1	2,28	0,047
Lot n° 2	2,37	0,05
Lot n° 3	2,55	0,06
Lot n° 4	3,20	0,072
Lot n° 5	3,59	0,07

3.2.4. - Étalonnages.

Ces étalonnages permettent d'obtenir la concentration volumique X en microsphères dans le milieu filtrant à partir de la mesure de l'intensité électrique, i , débitée par la cellule photoélectrique à couche d'arrêt. Celle-ci étant reliée à un galvanomètre de faible résistance à une caractéristique, courant débité i en fonction de l'intensité lumineuse reçue I , linéaire. Nous avons donc entre les différentes intensités la relation :

$$\frac{i_0}{i} = \frac{I_0}{I} \quad (15)$$

L'indice 0 est affecté aux différentes intensités obtenues en l'absence de microsphères dans la cellule de filtration.

En utilisant la relation (13) nous avons pu constater expérimentalement (voir figure n° 8) que la loi de Beer-Lambert :

$$\log \left(\frac{i_0}{i} \right) = K' \cdot X \quad (16)$$

ETALONNAGE OPTIQUE

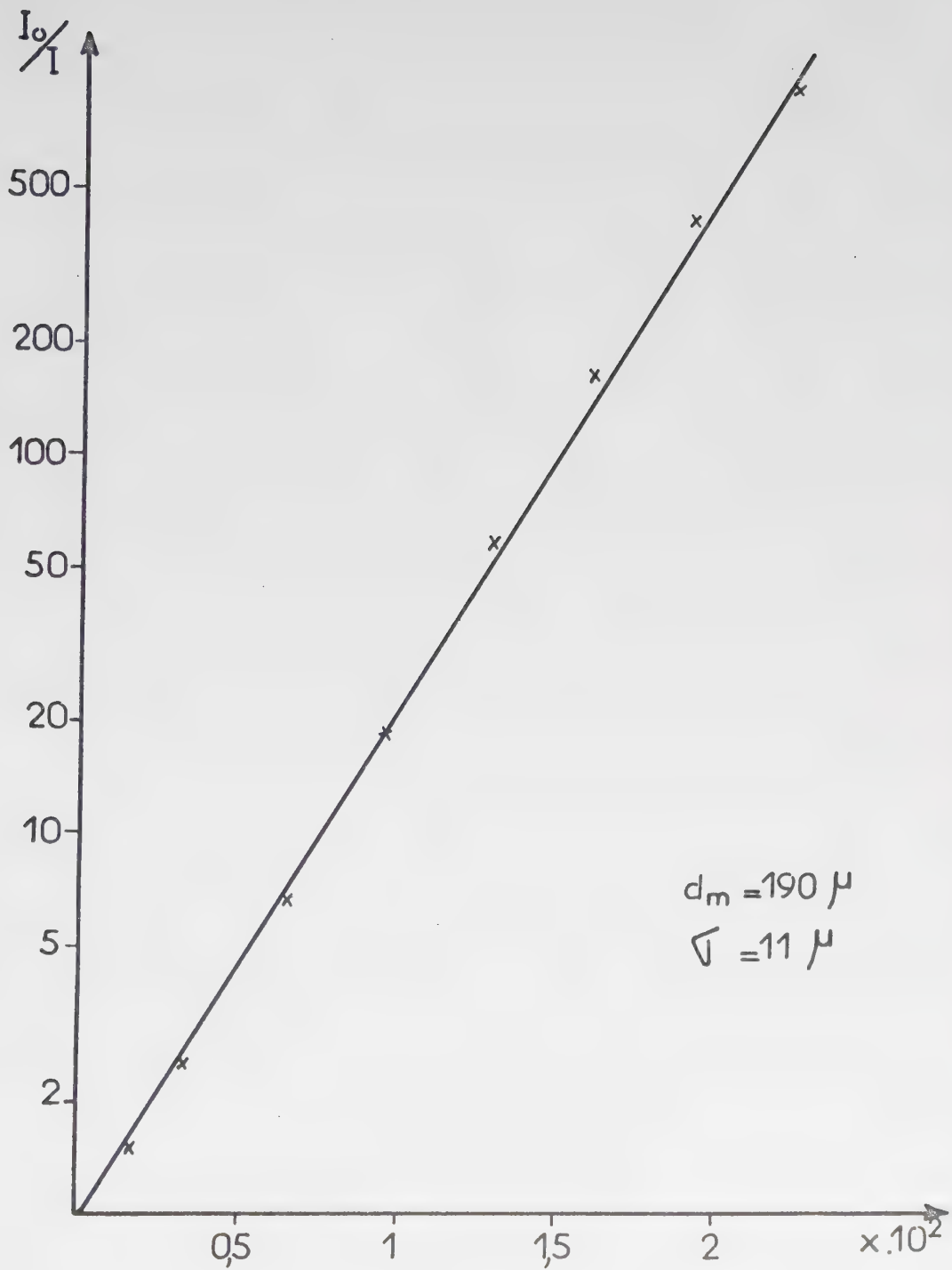


Fig 8

était vérifiée pour des suspensions de microsphères de diamètre d en faible concentration (X inférieure à $5 \cdot 10^{-2}$). La constante K' est une fonction décroissante du diamètre d .

Les étalonnages ont été réalisés dans des cellules identiques aux cellules de filtration; deux processus différents furent employés selon qu'il s'agissait d'un garnissage de sphères ou de cylindres.

Dans le cas de sphères, il était possible de réaliser des mélanges homogènes de sphères de verre et de microsphères en concentration connue.

Nous avons obtenu ainsi directement les courbes représentatives de la relation $i = f(X)$

Dans le cas des cylindres, il était impossible d'obtenir des concentrations homogènes et connues de microsphères dans le garnissage. Nous avons donc utilisé la relation :

$$\log \left(\frac{i_0}{i} \right) = K' X \quad (17)$$

obtenue à partir des relations (15) et (16).

La mesure des intensités électriques i_0 et i nous permet d'atteindre la valeur de la concentration X dans le réseau de cylindres, la constante K' étant déterminée lors de l'étalonnage en l'absence de cylindres.

Pour chaque série d'expériences (dans lesquelles d et Φ ou D sont fixées) nous avons fait un étalonnage préliminaire et un étalonnage de contrôle après les manipulations afin de vérifier qu'il n'y avait pas eu d'évolution des caractéristiques de la cellule photoélectrique.

33 - Modèles de répartition des particules en fonction de leur vitesse à l'intérieur du milieu filtrant - Nomenclature utilisée.

331. - Répartition des vitesses dans un milieu poreux filtrant.

Le volume V d'un milieu filtrant se subdivise en trois volumes élémentaires :

- Le volume $V.(1 - \varepsilon_o)$ du "massif filtrant",
- Le volume $V. \varepsilon_o.(1 - X)$ du liquide de suspension.

La vitesse locale u de ce liquide varie depuis une valeur nulle pour le liquide en contact avec la paroi des pores ou le liquide "mort" se trouvant dans certains pores ne participant pas à l'écoulement, jusqu'à une valeur maximale U atteinte dans la partie axiale des pores où l'écoulement de la suspension est rapide. Nous avons représenté sur la figure n° 9 la répartition probable des vitesses réelles du liquide dans le milieu filtrant. La vitesse moyenne u_m du liquide est donnée par la relation :

$$u_m = \frac{1}{V. \varepsilon_o.(1 - X)} \int u. dV' \quad (18)$$

$V. \varepsilon_o.(1 - X)$

Cette vitesse moyenne peut être déterminée à partir des données expérimentales en régime permanent :

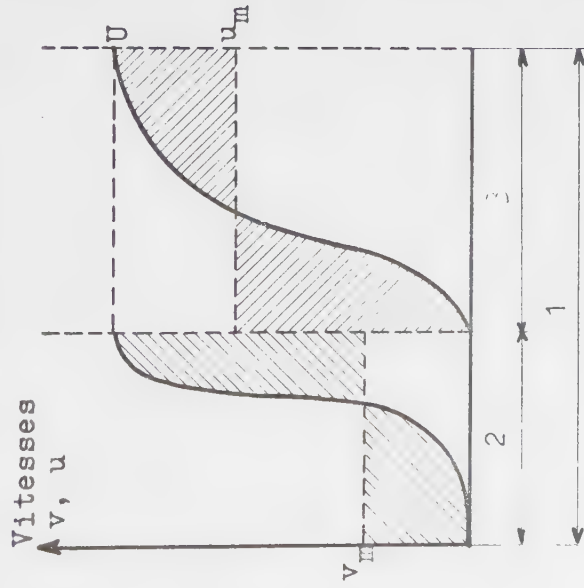
$$u_m = \frac{u_o}{\varepsilon_o.(1 - X)} \quad (19)$$

u_o étant la vitesse qu'aurait le liquide dans la cellule de filtration en l'absence de garnissage.

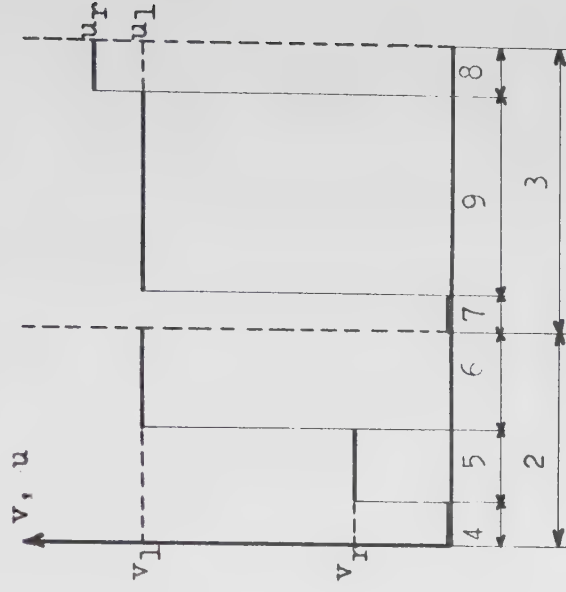
- Le volume $V. \varepsilon_o. X$ des particules dont la vitesse v
s'échelonne depuis une valeur nulle pour les particules

REPARTITION DES PARTICULES ET DU FLUIDE EN FONCTION DES VITESSES

Courbes réelles



Modèle général



1	Volume poreux unitaire	: $V\epsilon_0 = 1$	6	Volume des particules libres	: $(1-C_r-C_i)y$
2	" des particules	: X	7	" du liquide mort	: $(1-\beta_i)C_i$
3	" du liquide	: $1 - X$	8	" du liquide mobile dans les sites de rétention réversible	: $(1-\beta_r)C_r$
4	" des particules fixes	: $C_i\beta_i$	9	Volume du liquide libre	: $(1-C_i-C_r)(1-y)$
5	" des particules freinées	: $C_r\beta_r$			

fixées irréversiblement dans certains sites de rétention jusqu'à une valeur maximale $v = U$ pour les particules progressant à la même vitesse que le liquide dans les pores où l'écoulement est rapide. Le diagramme des vitesses v est tracé sur la figure n° 9, et la vitesse moyenne v_m des particules est donnée par la relation :

$$v_m = \frac{1}{V \cdot \varepsilon_o \cdot X} \int_0^U v \cdot dV \quad (20)$$

La détermination expérimentale des diagrammes des vitesses u et v étant très délicate, nous sommes amenés à faire des hypothèses simplificatrices et à présenter un modèle général de répartition des particules et du liquide en fonction de leur vitesse.

332. - Modèle général.

Dans ce modèle, nous diviserons le volume poreux $V \cdot \varepsilon_o$ en trois domaines fictifs élémentaires :

— Un premier domaine de volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_i$ dans lequel se trouvent des particules fixes occupant le volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_i \cdot \beta_i$ et du liquide "mort" de volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_i \cdot (1 - \beta_i)$. Le coefficient β_i représente la compacité de l'empilement des particules fixes dans ce domaine où les vitesses sont $v = u = 0$.

— Un deuxième domaine de volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_r$ où les particules sont uniformément freinées ($v = v_r = \text{constante}$) et occupent le volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_r \cdot \beta_r$; β_r est la fraction de volume occupée par les particules dans ce domaine. Celui-ci

est essentiellement constitué par les sites de caverne se trouvant en amont des rétrécissements de pores et dans lesquels les particules frappent un grand nombre de fois la paroi du matériau filtrant avant de franchir le rétrécissement.

Du fait de la convergence des lignes de courant vers les rétrécissements de pores, le liquide, qui occupe le volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot C_r (1 - \beta_r)$, se trouve accéléré dans ce domaine, et sa vitesse u_r est supérieure à la vitesse moyenne u_m .

— Un troisième domaine de volume $V \cdot \varepsilon_o (1 - C_i - C_r)$ où le liquide et les particules progressent librement à la même vitesse : $u_l = v_l$. La concentration en particules dans ce domaine est égale à la concentration y de la suspension; le liquide occupe donc un volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot (1 - C_i - C_r)(1 - y)$ et les particules un volume $V \cdot \varepsilon_o \cdot (1 - C_i - C_r)y$.

Le diagramme des vitesses correspondant à cette division en trois domaines est représenté sur la figure n° 9.

La valeur globale X , obtenue par photométrie d'absorption, de la concentration en particules dans le volume poreux $V \cdot \varepsilon_o$, est la somme de trois termes correspondant à chacun de ces domaines :

$$X = C_i \beta_i + C_r \beta_r + [1 - (C_i + C_r)] \cdot y = X_i + X_r + X_l \quad (21)$$

Lorsque l'écoulement de la suspension à travers le milieu poreux se fait en régime permanent, nous pouvons établir les bilans de conservation des débits de liquide et de particules.

	Débit à l'entrée et à la sortie du milieu filtrant	Débit à l'intérieur du milieu filtrant
Particules	$u_o y$	$= \epsilon_o [C_r \beta_r v_r + (1-C_r-C_i)y.u_1]$
Liquide	$u_o (1-y)$	$= \epsilon_o [C_r(1-\beta_r)u_r + (1-C_r-C_i)(1-y)u_1]$

La description détaillée, à l'aide de ce modèle, d'un milieu filtrant partiellement colmaté, nécessite la détermination de nombreuses inconnues; C_i , β_i , C_r , β_r , u_r , v_r , $u_1 = v_1$. Etant donné le petit nombre d'informations expérimentales et de relations entre ces inconnues, leur calcul nécessiterait de trop nombreuses hypothèses pour qu'il soit intéressant d'appliquer ce modèle général. Nous en avons donc déduit trois modèles plus rudimentaires, mais permettant de décrire le milieu filtrant à partir de nos informations expérimentales.

333 - Modèle I : Particules uniformément freinées.

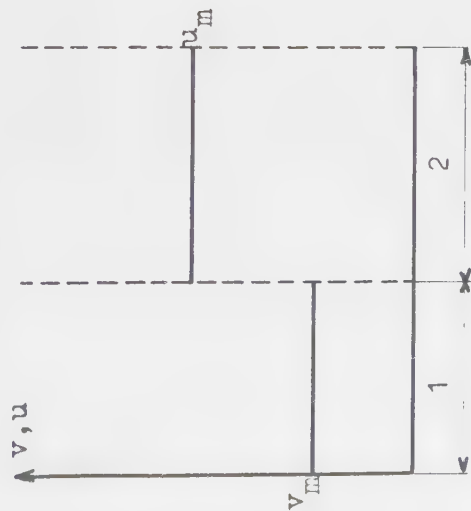
Dans ce modèle, nous supposons que toutes les particules progressent à la même vitesse v_m et que le liquide s'écoule à une vitesse uniforme u_m (figure n° 10). Les inconnues du modèle général prennent donc les valeurs suivantes :

$$C_r = 1, \quad C_i = 0, \quad v_r = v_m \quad \text{et} \quad u_r = u_m,$$

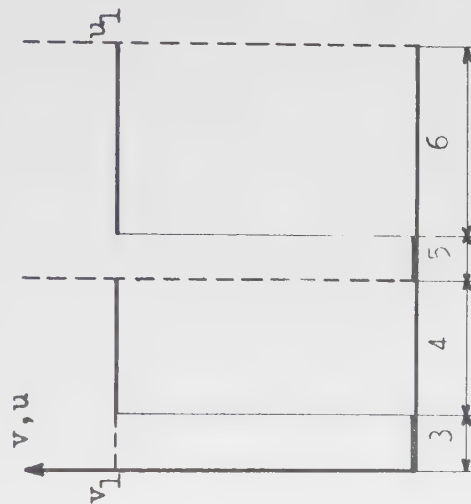
et les différents bilans de matière, en régime permanent, s'écrivent :

MODELES DE REPARTITION DES PARTICULES ET DU FLUIDE EN FONCTION DES VITESSES

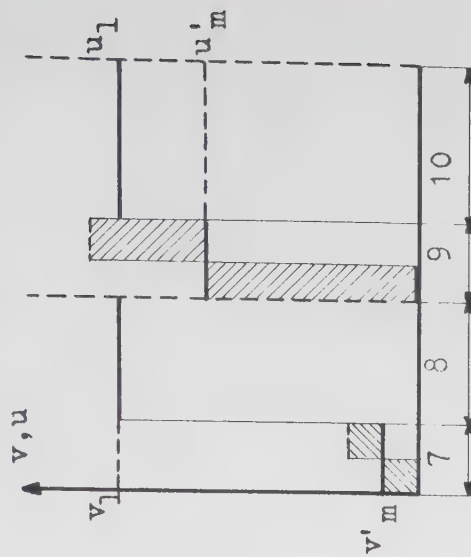
Modèle I



Modèle II



Modèle III



1 Volume des particules

: X

2 " du liquide

; 1 - X

3 " des particules fixes

: $C_i \beta_i$

4 " des particules libres

: $(1 - C_i)y$

5 " du liquide mort

: $(1 - \beta_i)C_i$

6 " du liquide libre

: $(1 - C_i)(1 - y)$

7 Volume des particules dans les sites de rétention colmatables

: $C_m \cdot \beta$

8 Volume des particules libres

: $(1 - C_m)y$

9 volume du liquide dans les sites de rétention colmatables

: $(1 - \beta)C_m$

10 Volume du liquide libre : $(1 - C_m)(1 - y)$

FIGURE N° 10

$$X = X_r = \beta_r \quad (22)$$

$$u_o \cdot y = \varepsilon_o \cdot X \cdot v_m \quad (23)$$

$$u_o \cdot (1-y) = \varepsilon_o \cdot (1-X) \cdot u_m \quad (24)$$

En divisant membre à membre les équations (23) et (24) nous obtenons :

$$\lambda_m = \frac{v_m}{u_m} = \frac{y}{1-y} \cdot \frac{1-X}{X} \quad (25)$$

où $\lambda_m = \frac{v_m}{u_m}$ est le coefficient d'entraînement moyen des par-

ticules par le liquide de suspension; il caractérise le ralentissement uniforme des particules par le massif filtrant.

Ce ralentissement résulte des nombreux chocs des particules sur la paroi du matériau filtrant entraînant une augmentation de leur concentration dans le milieu poreux.

Le coefficient λ_m est la grandeur caractéristique de ce premier modèle.

334 - Modèle II : Particules fixes et Particules libres.

Contrairement au modèle précédent, nous admettons dans ce modèle qu'il n'y a pas de particules freinées ($C_r = 0$) mais uniquement des particules fixes et des particules libres. Le diagramme des vitesses correspondant est tracé sur la figure n° 10.

Si $C_1 = C$ est la fraction de volume occupée par les particules fixes et le liquide mort, les différents bilans de matière s'écrivent :

$$X = C. \beta_i + (1 - C)y \quad (26)$$

$$u_o y = \varepsilon_o \cdot (1 - C).y.u_1 \quad (27)$$

$$u_o (1-y) = \varepsilon_o (1-C)(1-y)u_1 \quad (28)$$

Le coefficient β_i , caractérisant la compacité de l'empilement des particules dans les sites de rétention irréversible, peut être calculé à partir de la compacité $\beta_o = 1 - \varepsilon_o$ du milieu filtrant exempt de particules et de la compacité totale β_t lorsque ce milieu est rempli de particules :

$$\beta_t = \beta_o + \varepsilon_o \cdot \beta_i$$

d'où

$$\beta_i = \frac{\beta_t - \beta_o}{\varepsilon_o} \quad (29)$$

Mac GEARY²² a étudié la compacité totale maximale $(\beta_t)_m$ d'un mélange de sphères de diamètre D et de microsphères de diamètre d ; lorsque le rapport des diamètres $\frac{d}{D}$ est inférieur à 0,10, il trouve pour $(\beta_t)_m$ une valeur d'environ 0,845.

En mesurant la compacité β_o nous avons ainsi déterminé, dans le cas de l'empilement de sphères, la compacité maximale β_i de l'empilement des microsphères dans les sites de rétention irréversible. Pour $\beta_o = 0,625$ par exemple, nous obtenons $\beta_i = 0,59$.

Connaissant le coefficient β_i , que nous supposons constant, nous pouvons calculer à partir de la relation (26) la valeur de la grandeur caractéristique dans ce modèle, C que nous appellerons rétention dans le milieu filtrant :

$$C = \frac{X - y}{\beta_i - y} \quad (30)$$

La vitesse des particules et du fluide libres est, dans ce cas :

$$u_1 = v_1 = \frac{u_0}{\varepsilon_0 (1 - C)} \quad (31)$$

335. - Modèle III - Particules (fixes + freinées) et Particules libres.

Dans ce modèle, nous ne ferons pas, du point de vue macroscopique, la différence entre les particules fixes et les particules freinées; à cet effet, nous poserons :

$$C_m \cdot \beta = C_i \cdot \beta_i + C_r \cdot \beta_r \quad (32)$$

$$\text{avec } C_m = C_r + C_i \quad (33)$$

C_m représente la fraction du volume poreux colmatable essentiellement constituée par les sites de cavernes placés en amont des rétrécissements de pores; le ralentissement des particules dans ces sites favorise leur rétention irréversible dans les crevasses qui s'y trouvent.

Les sites colmatables contiennent donc des particules fixes et des particules freinées; leur taux de remplissage est donc intermédiaire entre β_i et β_r .

Le bilan de particules dans le milieu poreux s'écrit :

$$X = C_m \cdot \beta + (1 - C_m)y \quad (34)$$

La fraction colmatable C_m étant déterminée par l'étude de la texture du milieu filtrant, nous déduisons de l'équation (34) l'expression de la grandeur caractéristique de ce modèle, le taux de remplissage β en fonction des données expérimentales X et y :

$$\boxed{\beta = \frac{X - y}{C_m} + y} \quad (35)$$

Dans ce troisième modèle tout se passe comme si, dans les sites colmatables, les particules progressaient à la vitesse moyenne v'_m et le fluide à la vitesse uniforme u'_m . Le diagramme des vitesses correspondant se trouve sur la figure n° 10.

Le but du présent travail est de déterminer, pour chacune des différentes textures de milieu filtrant que nous avons étudiées, quel est celui des trois modèles qui est le plus représentatif de l'état de colmatage du milieu considéré.

-Remarque : Etant donné que nous avons toujours utilisé des suspensions de faible concentration (y inférieure à 10^{-2}) nous pouvons négliger y devant 1 ou β_1 et les expressions du coefficient d'entraînement λ_m et de la rétention C deviennent :

$$\lambda_m \simeq \frac{Y}{X} (1 - X) \quad (36)$$

$$\text{et } C \simeq \frac{X - Y}{\beta_1} \quad (37)$$

C h a p i t r e I V

Etude de la rétention de microsphères dans un réseau de cylindres

Afin d'étudier isolément quelques-uns des processus de rétention, nous avons réalisé différents réseaux que nous présenterons dans l'ordre de leur complexité croissante.

4.1. - Rétention dans un réseau de cylindres en quinconce.

Ce réseau, schématisé sur la figure n° 2, est caractérisé par le fait que l'écartement minimal e entre les surfaces des cylindres voisins est constant : $e = 0,82 \pm 0,1$ mm. Cet écartement étant toujours sensiblement plus élevé que le diamètre des microsphères et les masses volumiques du liquide ρ_l et des microparticules ρ_s étant identiques, le seul processus de colmatage possible est l'interception directe des microsphères par la surface des cylindres et leur rétention par adhérence à cette surface. La disposition des cylindres étant réalisée de manière qu'il y ait nécessairement contact des microsphères avec leur surface, l'évolution de leur concentration X dans le réseau nous renseignera donc directement sur l'intensité de l'adhérence de ces particules aux cylindres de verre.

A l'aide de l'appareil à alimentation discontinue, nous avons fait circuler sous pression constante une suspension de concentration connue y à travers le réseau de cylindres en quinconce qui a une porosité $\epsilon_0 = 0,45$. La résistance hydraulique de ce réseau ne variant pas, nous avons constaté que le débit de suspension restait constant pendant toute la durée d'une expérience. Nous avons caractérisé ce débit par le

nombre de Reynolds rapporté au garnissage et dont l'expression est :

$$Re_g = \frac{u_o \cdot \rho}{s_g \cdot (1 - \varepsilon_o) \cdot \eta} \quad (38)$$

u_o est la vitesse qu'aurait le fluide traversant la cellule ne contenant pas le garnissage, ρ la masse volumique de la suspension, ε_o la porosité du milieu poreux, et η la viscosité dynamique de la suspension. La surface spécifique s_g est, dans le cas d'un réseau de cylindres de diamètre Φ , égale à $\frac{4}{\Phi}$, de sorte que le nombre de Reynolds s'écrit :

$$Re_g = \frac{u_o \cdot \rho \cdot \Phi}{4 \cdot (1 - \varepsilon_o) \cdot \eta} \quad (39)$$

A une vitesse d'écoulement $u_o = 0,27 \text{ cm/s}$ obtenue sous la pression de 50 cm d'eau, correspond un nombre de Reynolds $Re_g = 7$. Celui-ci entre dans la gamme caractéristique d'un écoulement intermédiaire entre le régime purement laminaire (Re_g inférieur à 1) et le régime franchement turbulent (Re_g supérieur à 10).

Nous avons étudié l'influence de la dimension des microsphères en utilisant différents lots dont les diamètres moyens s'échelonnaient de 60 à 320 microns. Le rapport $\frac{d}{e}$ du diamètre moyen des microsphères à l'écartement minimal entre les cylindres a pris, dans les différents groupes d'expériences, les valeurs moyennes suivantes : 0,07 0,15 0,20 0,23 0,28 0,33 0,36 0,39. Pour chacune de ces valeurs, nous avons utilisé quatre suspensions de concentration différente : $y = 0,2 \cdot 10^{-2}$; $0,5 \cdot 10^{-2}$; 10^{-2} et $2 \cdot 10^{-2}$.

Dans toutes ces expériences, nous avons obtenu des résultats analogues à ceux concrétisés par les courbes de la figure n° 11. Nous constatons qu'après une mise en équilibre

CINETIQUE du COLMATAGE dans un RESEAU
de CYLINDRES en QUINCONCE

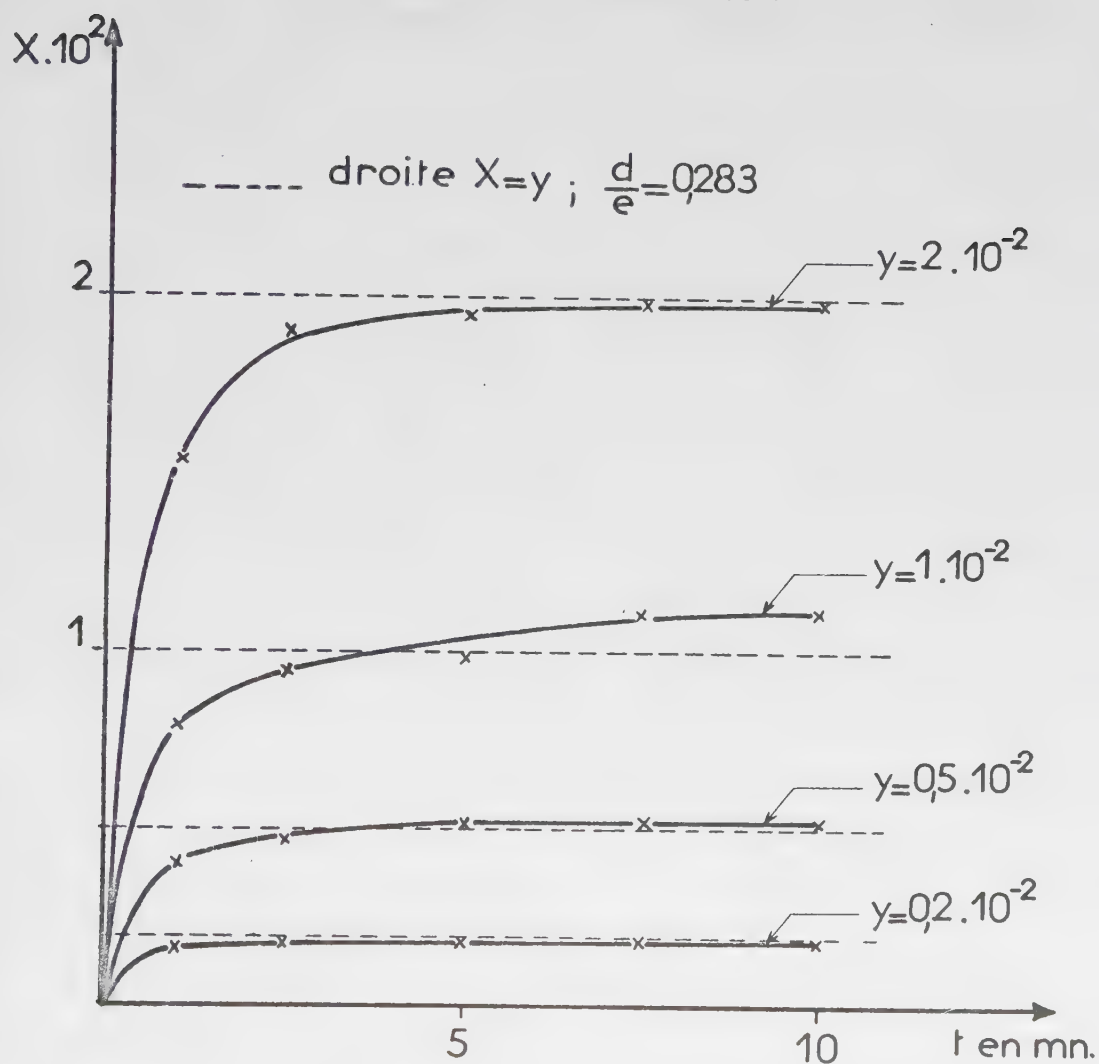


Fig 11

de deux à trois minutes correspondant au temps d'acheminement de la suspension depuis le réservoir jusqu'à la cellule de filtration préalablement remplie de liquide pur, la concentration X en microsphères dans le volume libre du milieu poreux atteint la même valeur y que celle de la suspension et s'y stabilise.

Il en résulte qu'il n'y a pas de rétention à l'intérieur du réseau, donc pas d'adhérence des microsphères à la surface des cylindres.

Ceci a été confirmé en faisant circuler après la suspension et au même débit, du liquide pur; le fait que la concentration X s'annule presque instantanément indique que les microsphères étaient mobiles dans le réseau.

Si, a priori, les forces de Van der Waals pouvaient être négligées à cause de leur petit rayon d'action et leur faible intensité vis-à-vis des forces hydrauliques et mécaniques s'exerçant sur une particule d'au moins 60 microns de diamètre, il n'en était pas de même pour les forces électrostatiques. En effet, nous avons constaté que des microsphères en polystyrène sulfoné fluidisées par un courant d'air dans un appareil en verre adhéraient, vraisemblablement par des forces d'origine électrostatique, à la paroi de l'appareil; il est donc probable que la nature du liquide de suspension que nous avons choisi a eu une action déterminante dans l'élimination de ces forces.

Pour la suite de nos travaux, qui se feront toujours avec des microsphères de diamètre supérieur à 60 microns et des critères de Reynolds supérieurs ou égaux à 7, nous négligerons les forces d'adhérence vis-à-vis des autres types de forces.

D'autre part, afin d'étudier sur une gamme plus étendue l'influence éventuelle de la valeur du rapport $\frac{d}{e}$ sur

la rétention, nous avons réalisé d'autres plaquettes donnant un réseau semblable, mais dont l'écartement minimal était : $e = 0,52 \pm 0,1$ mm et permettant ainsi l'étude des rapports $\frac{d}{e} = 0,46 \quad 0,51 \quad 0,53 \quad \text{et} \quad 0,57$.

Pour les suspensions de concentration $y = 0,2 \cdot 10^{-2}$ et $0,5 \cdot 10^{-2}$ les résultats sont identiques à ceux obtenus avec les rapports $\frac{d}{e}$ inférieurs à 0,46.

Pour les fortes concentrations ($y = 10^{-2}$ et $2 \cdot 10^{-2}$) nous avons constaté qu'avec ces différentes valeurs du rapport $\frac{d}{e}$ la concentration X dans le réseau était sensiblement supérieure à celle de la suspension et augmentait en fonction de la durée d'écoulement de la suspension : après un quart d'heure d'écoulement de la suspension, la concentration X était de l'ordre de 1,5 à 2 fois la concentration y de la suspension colmatante.

L'appareil étant à alimentation discontinue de suspension, nous n'avons pas pu prolonger les expériences pour voir si la concentration X atteignait une valeur stationnaire.

D'autre part, l'annulation de la concentration X après lavage du réseau de cylindres par un liquide pur, indique que les microsphères étaient uniquement ralenties à la traversée du réseau et non bloquées irréversiblement. Le modèle le plus représentatif de l'état de colmatage du réseau est donc le modèle I caractérisé par le coefficient d'entraînement λ_m ; toutefois, le régime permanent n'étant pas atteint, nous ne pouvons pas calculer la valeur de ce coefficient d'entraînement à partir des données expérimentales.

-Remarque : Cet effet de ralentissement des microsphères dans le réseau est opposé à celui que WHITMORE²³ a observé lors de l'écoulement d'une suspension dans un capillaire. Cet effet conduit à une diminution apparente de la concentration x de la suspension dans le capillaire; WHITMORE en

a donné une explication basée sur le fait que l'interception directe des particules par la paroi du matériau filtrant au voisinage d'un rétrécissement modifie le profil des vitesses de ces particules dans la suspension s'écoulant dans le capillaire situé en aval de ce rétrécissement.

En effet, considérons sur la figure n° 12, la ligne de courant qui est à la distance L de la paroi dans le tube de rayon R_0 et qui va se trouver à une distance r_1 , égale au rayon des particules, de la paroi dans le capillaire de rayon R_1 . Le bilan de matière du fluide nous donne :

$$\frac{L}{R_0} = \frac{r_1}{R_1} \quad (40)$$

Toutes les particules contenues initialement dans la zone annulaire d'épaisseur L vont se trouver concentrées dans une zone fixe au contact de la paroi du capillaire. Du fait de leur interception par la paroi, certaines particules vont être repoussées vers le centre du capillaire et se placer sur une ligne de courant où la vitesse du fluide est plus élevée que sur celle où ils auraient été s'ils n'avaient pas été interceptés. Si $r_1 \ll R_1$, nous pouvons dans la zone annulaire d'épaisseur r_1 assimiler le profil parabolique des vitesses à la tangente à la paroi. Dans ces conditions, les centres des particules ayant été déplacés en moyenne de la distance $\frac{r_1}{2}$, leur vitesse est doublée et par suite leur concentration divisée par 2.

Calculons leur concentration moyenne x dans le capillaire en fonction de la concentration y de la suspension initiale. Nous avons :

$$\pi \cdot R_1^2 \cdot x = \pi \cdot (R_1 - r_1)^2 \cdot y + \pi \cdot \left[R_1^2 - (R_1 - r_1)^2 \right] \cdot \frac{y}{2}$$

$$\text{d'où} \quad x = y \cdot \left[\left(\frac{1-r_1}{R_1} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{1-r_1}{R_1} \right)^2 \right) \right] \quad (41)$$

Etant donné que nous avons supposé $r_1 \ll R_1$ le terme quadratique est négligeable et nous avons finalement :

$$\frac{x}{y} = 1 - \frac{r_1}{R_1} \quad (42)$$

WHITMORE²³ a vérifié expérimentalement la validité de cette relation en faisant écouler des suspensions de microsphères en polystyrène dans des capillaires où il a observé que la concentration x en particules était jusqu'à 20 % inférieure à la concentration y de la suspension pénétrant dans ces capillaires.

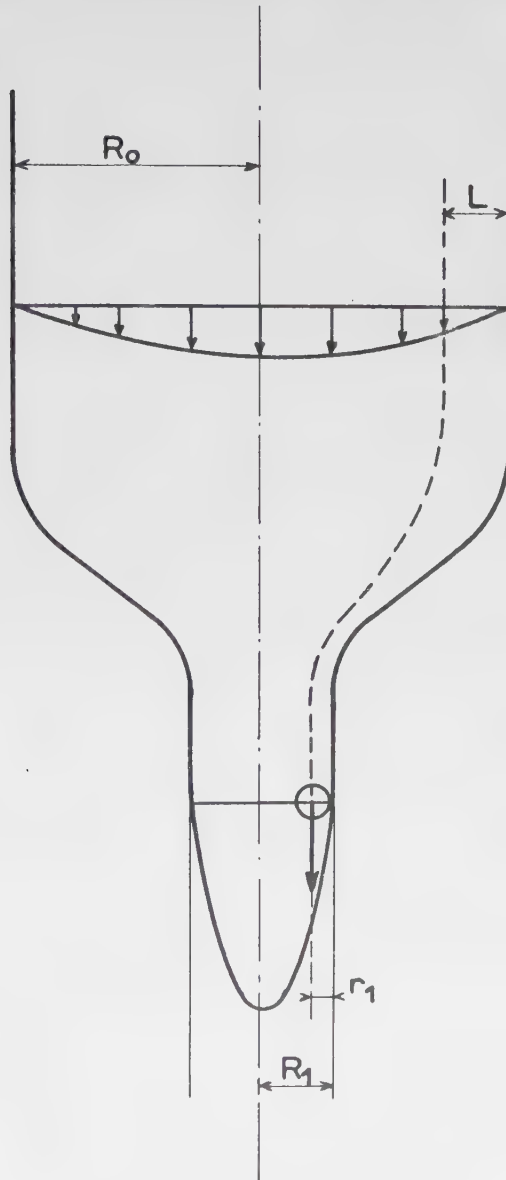
Nous aurions pu penser que le même phénomène existerait dans le cas d'un réseau de cylindres en quinconce et qu'une diminution locale de concentration aurait lieu dans les rétrécissements entre cylindres.

Cependant, il faut noter que, pour observer cet effet, il est nécessaire, d'une part, que le capillaire soit suffisamment long pour que le profil parabolique des vitesses puisse s'établir, d'autre part, que le centre de la microsphère se déplace à la même vitesse que le fluide excluant ainsi tout frottement sur la paroi du capillaire.

Dans les milieux poreux que nous avons utilisés, les "pores" constitués par les rétrécissements étant très courts (de l'ordre de grandeur de leur largeur), il ne peut pas s'établir un profil parabolique des vitesses et les chocs aléatoires des particules sur les parois des rétrécissements étant équivalents à un freinage par frottement, nous ne pouvions pas observer un tel effet de diminution de concentration.

Figure n° 12

EFFET D'ACCELERATION des GRAINS dans un CAPILLAIRE



4.2. - Rétention dans un réseau de cylindres jointifs et alignés.

Ce deuxième réseau a été conçu pour étudier les possibilités de coinçage des particules dans des crevasses latérales à l'écoulement. Il est schématisé sur la figure n° 2 et se compose de rangées équidistantes (écartement minimal entre les surfaces des cylindres $e = 0,82 \pm 0,1$ mm) et parallèles de cylindres accolés suivant une génératrice. L'écoulement de la suspension se faisant parallèlement au plan des génératrices de contact, les crevasses au voisinage de ces génératrices lui sont latérales. La porosité de ce réseau est $\varepsilon_0 = 0,38$.

L'adhérence ayant été éliminée par les expériences précédentes, le seul processus de rétention possible est le coinçage des microsphères dans les crevasses. Pour que ce processus se réalise, il faut qu'une microsphère amenée par diffusion turbulente au voisinage du site de crevasse prenne contact avec ce site en ayant une énergie cinétique minimale $(E_c)_m$. L'énergie utile pour le coinçage de la particule est : $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v'^2$ où v' est la composante de la vitesse de la particule située dans le plan de symétrie de la crevasse normalement à la génératrice de contact (voir figure n° 13).

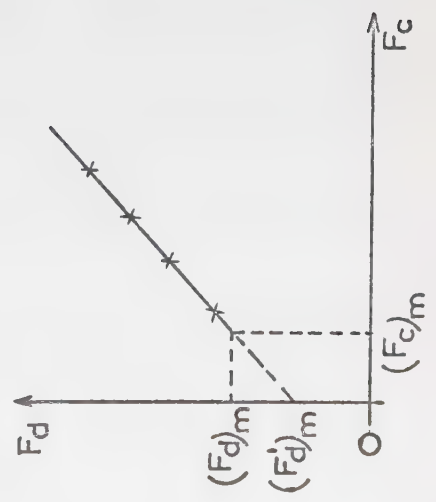
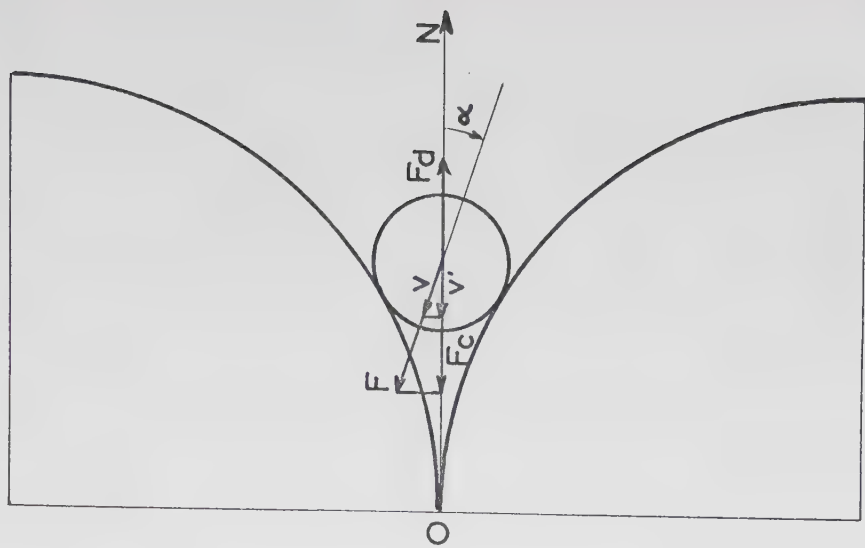
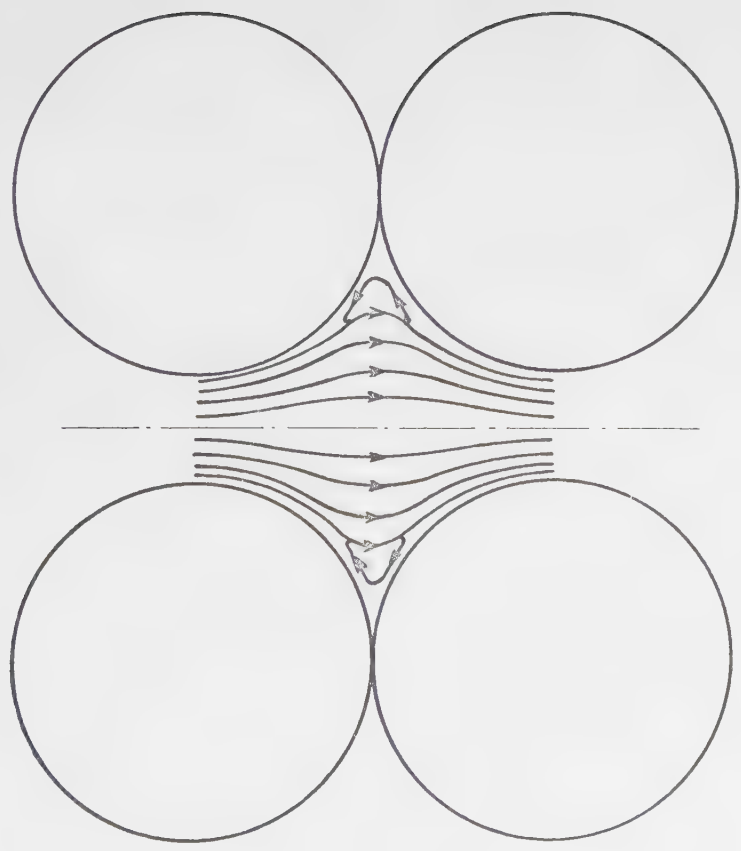
Si v est la vitesse de la microsphère et α l'angle de la direction de cette vitesse avec la direction normale ON nous avons :

$$E_c = \frac{1}{2} m (v \cos \alpha)^2 \quad (43)$$

Pour qu'il y ait coinçage, l'intensité et la direction de la vitesse de la particule doivent satisfaire à la relation :

$$v \cdot \cos \alpha \geq \sqrt{\frac{2 (E_c)_m}{m}} \quad (44)$$

RETENTION dans un SITE de CREVASSE



Dans cette inéquation, le terme $(E_c)_m$ est essentiellement fonction de la géométrie et de l'état de surface des particules et de la paroi de la crevasse; le terme $v \cdot \cos \alpha$ dépend de la configuration des lignes de courant du fluide au voisinage de la crevasse, donc du régime d'écoulement de la suspension dans le milieu poreux. Nous avons schématisé sur la figure n° 13 les lignes de courant du fluide dans le cas d'un écoulement en régime laminaire dans le réseau "jointifs alignés".

Pour qu'il y ait décoincage des particules, il faut exercer une force dont la composante normale suivant $\vec{ON}$ soit dirigée vers l'extérieur de la crevasse, et ait une intensité minimale F_d qui doit être une fonction croissante de l'énergie avec laquelle la particule a été coincée dans la crevasse, (voir figure n° 13). Cette force F_d est toujours supérieure à la force $(F'_d)_m$ nécessaire pour réentraîner une particule venue se placer dans un site de crevasse avec une énergie cinétique nulle; $(F'_d)_m$ dépend essentiellement de l'angle de frottement α_f de la particule sur la paroi de la crevasse.

Expérimentalement, nous avons essayé de voir s'il y a possibilité de coinçage des particules dans des sites de crevasse latéraux en faisant circuler à travers le réseau "jointifs alignés" une suspension de microsphères de diamètre moyen 275μ (le rapport $\frac{d}{e}$ correspondant est égal à 0,35) à différents débits (les nombres de Reynolds correspondants étaient $Re_g = 3,5; 7$ et 15) et à différentes concentrations ($y = 0,2 \cdot 10^{-2}$ $0,5 \cdot 10^{-2}$ 10^{-2} et $2 \cdot 10^{-2}$).

Même au débit le plus élevé où l'écoulement était franchement turbulent, il n'y a pas eu de rétention des microsphères, la concentration X dans le réseau restant très voisine de celle de la suspension et s'annulant par lavage avec un liquide pur.

Ce résultat peut avoir deux causes différentes : soit que la géométrie du réseau, caractérisée par une très faible tortuosité des lignes de courant du fluide, ne favorise pas le contact des microsphères avec les sites de crevasse, soit, au contraire, que les microsphères arrivent en contact avec ces sites, mais avec une énergie cinétique insuffisante pour qu'il y ait coïncidence. Il est probable que la première hypothèse est la bonne, car comme nous le verrons au paragraphe 43, si les microsphères arrivaient en contact avec les sites de rétention et même si elles n'étaient pas captées, elles séjourneraient pendant un certain temps dans les tourbillons au voisinage de ces sites, entraînant ainsi une augmentation de leur concentration dans le réseau.

Ceci nous a amené à construire un troisième réseau présentant une grande tortuosité des lignes de courant, favorisant ainsi le contact entre microsphères et sites de rétention.

-Remarque : Il faut noter que la rétention d'une rangée de microsphères dans le fond de chaque crevasse amènerait une variation importante de la concentration X dans le réseau ($dX = 1,4 \cdot 10^{-2}$ pour des particules de 275μ de diamètre), en sorte que le faible écart ($X - y$ toujours inférieur à 10^{-3}) que l'on observe dans certaines expériences, ne correspond nullement à une telle rétention.

4.3. - Rétention dans un réseau de cylindres jointifs et en quinconce.

Ce modèle, synthèse partielle des deux précédents, présente (figure n° 14) les caractéristiques suivantes :

— Les sites de crevasses sont, soit latéraux (III), soit semi-frontaux (II) pour les lignes de courant du fluide.

— Il y a des sites de cavernes (I) placés dans les coudes de pores. L'écartement minimal e est d'un millimètre et la porosité ε de 0,51. La texture de ce réseau permet l'étude de deux nouveaux mécanismes de colmatage :

— Coinçage dans les crevasses semi-frontales à section quasi-triangulaire.

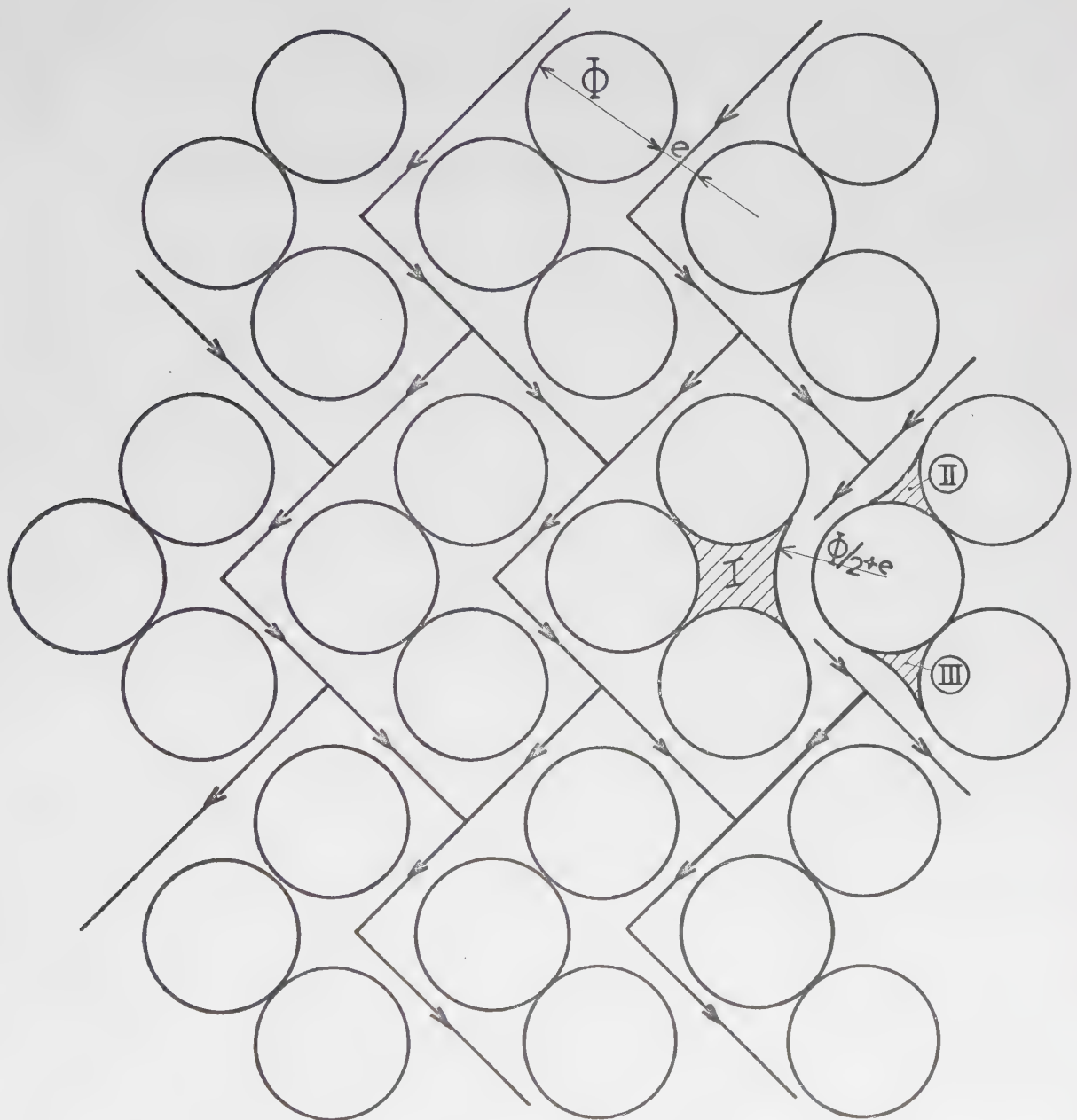
— Remplissage de cavernes à section quasi-carrée.

Nous avons étudié le colmatage d'un tel réseau avec deux lots différents de microsphères de diamètres moyens 160 et 200 microns (écarts types des distributions $\sigma = 9$ et 10μ); les rapports $\frac{d}{e}$ correspondants sont respectivement 0,16 et 0,20. Pour chacun de ces lots, nous avons fait deux séries d'expériences; l'une, avec un liquide de même masse volumique ρ_l que celle ρ_s des microsphères, l'autre, avec des liquides de masse volumique différente afin d'étudier les effets de sédimentation et d'inertie.

4.3.1 - Etude avec $\rho_s = \rho_l$.

En faisant circuler à travers le réseau une suspension de concentration $y = 0,5 \cdot 10^{-2}$ à une vitesse $u = 0,23$ cm/s ($Re_g = 6$) nous avons observé une augmentation sensible de la concentration X en microsphères dans le réseau (figure n° 15); elle se stabilise après environ un quart d'heure à la valeur $X = 1,1 \cdot 10^{-2}$ dans le cas où

RESEAU "QUINCONCE-JOINTIF"



- I Caverne "carrée"
- II Crevasse "triangulaire" semi-frontale
- III Crevasse "triangulaire" latérale

Fig 14

INFLUENCE de la MASSE VOLUMIQUE du LIQUIDE
sur la CONCENTRATION X en GRAINS dans le RESEAU
"JOINTIF. QUINCONCE"

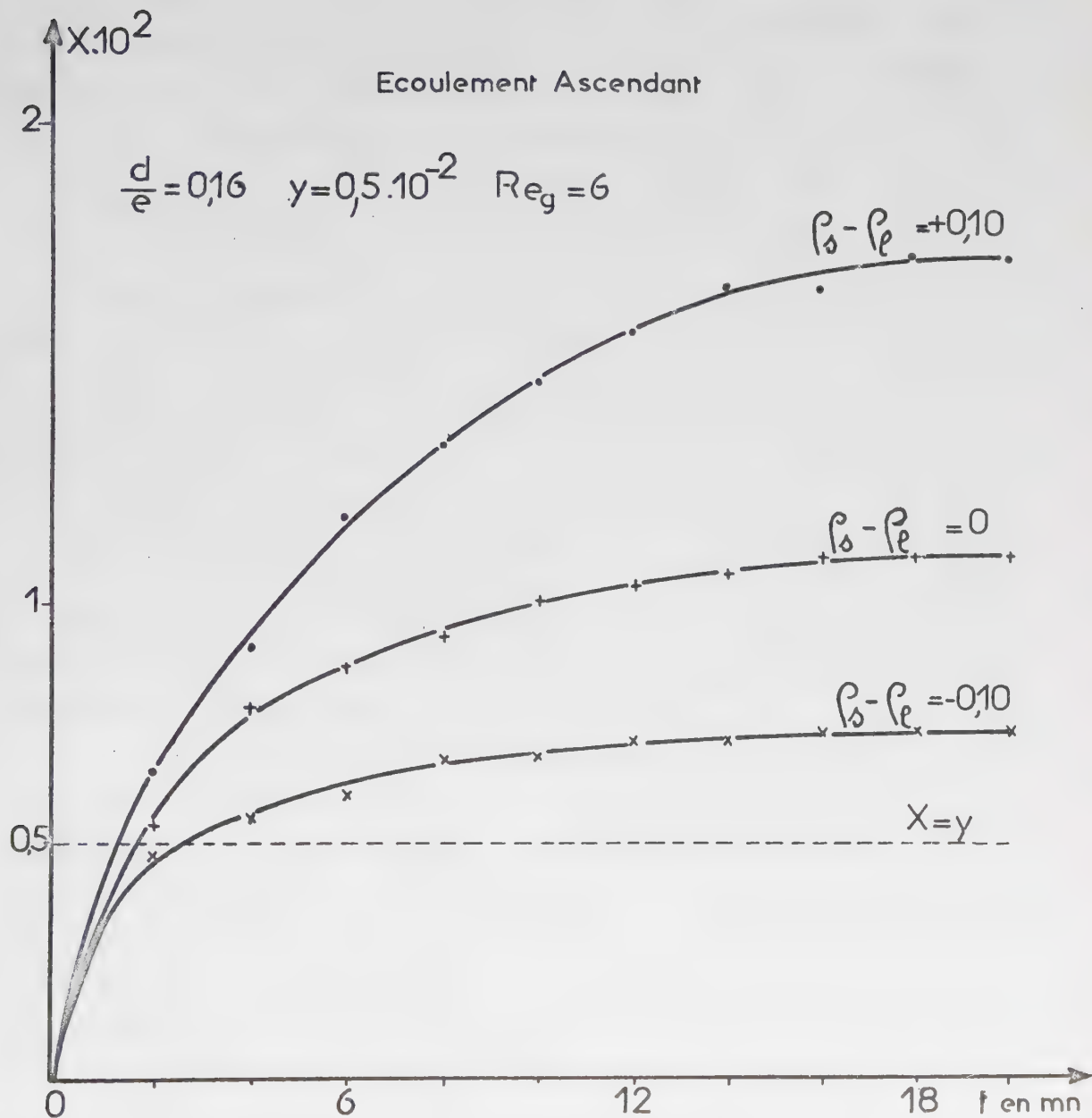


Fig 15

$\frac{d}{e} = 0,16$ et $1,25 \cdot 10^{-2}$ pour $\frac{d}{e} = 0,20$. En inversant le sens de l'écoulement de la suspension dans le réseau, nous avons obtenu des concentrations stationnaires pratiquement identiques (voir tableau n° 2 et figure n° 16). Celles-ci, nettement supérieures à la concentration y de la suspension, montrent qu'il y a rétention des microsphères dans le réseau; cependant, le lavage, au même débit, par un liquide pur annulant la concentration X indique que ces particules ne sont pas fixes à l'intérieur du réseau. Le mécanisme de coinçage dans une crevasse semi-frontale est donc à exclure.

Il en résulte que l'augmentation de concentration ne peut être due qu'à l'augmentation du temps de séjour des microsphères dans le réseau. Puisque dans les expériences avec les réseaux de cylindres "en quinconce" et "jointifs alignés" le temps de séjour des microsphères était le même que celui du fluide (X étant très peu différente de y), son augmentation ne peut provenir que des modifications de texture intervenant dans ce dernier modèle; c'est-à-dire l'apparition des crevasses semi-frontales et des cavernes.

Il est donc probable que le temps de séjour T_G d'une microsphère dans le réseau se décompose en deux :

— d'une part, un temps T_L correspondant à la traversée d'une microsphère à la même vitesse qu'un globule de fluide suivant une ligne de courant moyenne.

— d'autre part, un temps τ de séjour de la particule dans les crevasses semi-frontales et les cavernes.

$$\text{Nous avons la relation } T_G = T_L + \tau \quad (45)$$

Nous pouvons calculer la fraction de temps $\frac{\tau}{T_G}$ durant laquelle une microsphère, traversant le réseau, séjourne dans ces sites colmatables. v_m étant la vitesse moyenne de la microsphère et u_m celle du fluide, nous avons :

$$\frac{v_m}{u_m} = \frac{T_L}{T_G} = \frac{T_L}{T_L + \tau} \quad (46)$$

INFLUENCE de la MASSE VOLUMIQUE du LIQUIDE
sur la CONCENTRATION X en GRAINS dans le RESEAU
"JOINTIF-QUINCONCE"

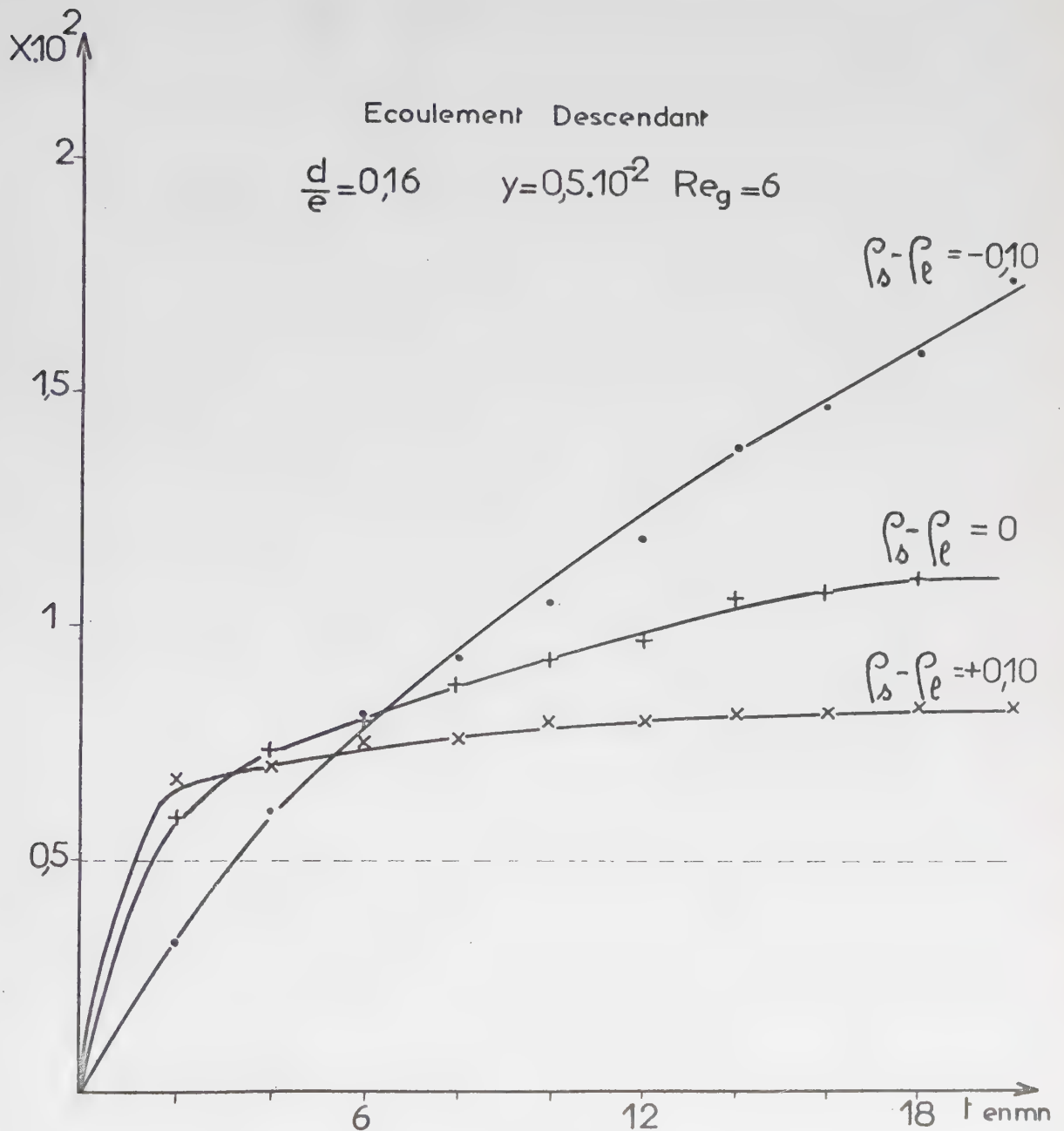


Fig 16

A l'équilibre stationnaire de concentration :

$$\frac{v_m}{u_m} = \frac{y}{X^*} = \frac{T_L}{T_L + \tau}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{\tau}{T_G} = 1 - \frac{y}{X^*} \quad (46)$$

Cette fraction de temps est égale à 0,55 pour $\frac{d}{e} = 0,16$ et 0,60 pour $\frac{d}{e} = 0,20$.

Les microsphères séjournant dans les sites colmatables, y sont en concentration plus grande que dans la suspension et le modèle le plus représentatif est celui caractérisé par le taux de remplissage β des sites colmatables. Etant donné qu'il n'y a pas de microsphères fixes, nous avons dans ce cas particulier $C_i \cdot \beta_i = 0$ d'où $C_r \cdot \beta_r = C_m \cdot \beta$

Pour déterminer la fraction C_m du volume poreux qui est colmatable, nous devons calculer les volumes des différents sites. Nous avons délimité les sites de cavernes par une portion de cylindre dont la section plane perpendiculairement aux génératrices est un arc de cercle tangent aux deux cercles extrêmes bordant une section plane de la caverne et dont le rayon est égal à $\frac{\Phi}{2} + e$ (figure n° 14).

Cet arc de cercle schématise la ligne de courant extrême du fluide qui ne pénètre pas dans le tourbillon dont la caverne est le siège. La section plane d'un site de crevasse quasi-triangulaire sera délimitée par un arc de cercle de même rayon que le précédent. Dans ces conditions, les volumes respectifs de chacun de ces sites sont $13,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3$ et $3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^3$. Pour l'ensemble des 45 groupes de trois cylindres formant le réseau complet, les volumes des sites sont donc : $6,1 \text{ cm}^3$ pour les cavernes "carrées" et $1,35 \text{ cm}^3$ pour les crevasses "semi-frontales". Leur volume global est de $7,45 \text{ cm}^3$ et le volume total libre dans le réseau étant

$V\varepsilon_0 = 63,5 \text{ cm}^3$, la fraction C_m du volume poreux colmatable est égale à $11,8 \cdot 10^{-2}$.

Le taux de remplissage β des sites colmatables est calculé à partir de la relation (35) :

$$\beta = \frac{X - Y}{C_m} + Y$$

Pour $\frac{d}{e} = 0,16$, $\beta = 5,6 \cdot 10^{-2}$ et pour $\frac{d}{e} = 0,20$,

$$\beta = 6,9 \cdot 10^{-2}.$$

Si ces taux de remplissage sont plus de dix fois supérieurs à la concentration de la suspension, ils sont cependant nettement inférieurs au taux de remplissage maximal β_1 qui est de l'ordre de 0,60.

4.3.2. - Etude avec ρ_1 différent de ρ_s .

Dans une deuxième série d'expériences, nous avons étudié, en changeant la masse volumique du fluide, l'influence de la sédimentation et de l'inertie des microsphères sur leur transport depuis le sein de la suspension circulant dans les pores jusqu'aux sites de rétention colmatables.

La différence de masse volumique entre le liquide et les microsphères entraîne leur sédimentation avec une vitesse v_s qui est approximativement égale à la vitesse limite donnée par la formule de STOKES :

$$v_s = \frac{1}{18} \cdot g \cdot \frac{d^2}{\eta} \cdot (\rho_s - \rho_1) \quad (47)$$

Avec les microsphères de 160μ de diamètre, nous avons utilisé des liquides tels que $\rho_s - \rho_1 = 0,10 \text{ g/cm}^3$.

En appliquant la formule (47) nous obtenons $v_s = 0,17 \text{ cm/s}$.

Pour $d = 200 \mu$ nous avons $\rho_s - \rho_1 = 0,07 \text{ g/cm}^3$ d'où $v_s = 0,186 \text{ cm/s}$. Ces valeurs de la vitesse de sédimentation sont des moyennes obtenues en prenant pour d les diamètres

moyens des lots de microsphères. Quoique l'écart type σ sur la distribution des diamètres soit assez faible (σ de l'ordre de 10μ), la vitesse de sédimentation, dépendant du carré du diamètre, fluctue assez sensiblement autour de ces valeurs moyennes. Les valeurs extrêmes sont pour le premier lot $0,14 \text{ cm/s}$ et $0,20 \text{ cm/s}$; pour le deuxième $0,155 \text{ cm/s}$ et $0,215 \text{ cm/s}$.

Les variations de la masse volumique ρ_1 étaient obtenues en changeant la proportion de benzène et de tétrachloréthylène dans le liquide de suspension.

Pour chacun des rapports $\frac{d}{e} = 0,16$ et $0,20$, nous avons réalisé quatre expériences différentes : un écoulement ascendant et un écoulement descendant de la suspension dans le réseau, avec pour chacun des sens, soit $\Delta\rho = \rho_s - \rho_1$ positif, soit $\Delta\rho$ négatif. Ces expériences ont été faites avec une suspension de concentration $y = 0,5 \cdot 10^{-2}$ dont la vitesse d'écoulement $u_o = 0,23 \text{ cm/s}$, correspond à un nombre de Reynolds $Re_g = 6$ et à une vitesse moyenne du liquide dans le réseau $u_m = 0,46 \text{ cm/s}$.

Comme le montrent les courbes des figures n° 15 et 16, l'équilibre stationnaire de concentration X est généralement atteint après une durée d'écoulement de la suspension de l'ordre de celle obtenue en l'absence de sédimentation. Les concentrations stationnaires obtenues dans les différentes expériences sont portées dans le tableau n° 2.

Tableau n° 2

$\frac{d}{e} = 0,16$	$\rho_s - \rho_l$		+0,10	0	-0,10
Ecoulement ascendant	λ_o	0,63	1	1,39	
	$X^* \cdot 10^2$	1,74	1,10	0,73	
	$\beta \cdot 10^2$	8,9	5,6	3,5	
	τ/T_G	0,545	0,545	0,51	
Ecoulement descendant	λ_o	1,37	1	0,62	
	$X^* \cdot 10^2$	0,84	1,11	1,77	
	$\beta \cdot 10^2$	4,2	5,6	8,6	
	τ/T_G	0,565	0,55	0,51	
=====					
$\frac{d}{e} = 0,20$	$\rho_s - \rho_l$		+0,07	0	-0,07
Ecoulement ascendant	λ_o	0,61	1	1,39	
	$X^* \cdot 10^2$	2,42	1,29	0,81	
	$\beta \cdot 10^2$	14,4	7,2	4,2	
	τ/T_G	0,66	0,61	0,56	
Ecoulement descendant	λ_o	1,4	1	0,59	
	$X^* \cdot 10^2$	0,88	1,21	2	
	$\beta \cdot 10^2$	4,9	6,6	10,6	
	τ/T_G	0,595	0,59	0,57	

On constate une variation ΔX très sensible de ces concentrations par rapport à celles obtenues en l'absence de sédimentation des microsphères. Cette variation résulte de deux effets :

A - Changement de la valeur absolue de la vitesse v des microsphères.

En l'absence de rétention dans les différents sites, la vitesse moyenne des microsphères est : $v_o = u_m \pm v_s$; le signe $+$ correspond au cas où la vitesse moyenne u_m du fluide et la vitesse de sédimentation v_s sont de même sens, et le signe $-$ au cas contraire.

Ceci entraîne une variation de la concentration en microsphères dans le réseau qui passe de la valeur y à la valeur y_a telle que : $\frac{y_a}{y} = \frac{u_m}{v_o}$ (48). Il faut noter

que cette variation de la concentration ne se produit qu'à l'intérieur du réseau car les conduites amenant la suspension jusqu'à la cellule de filtration sont de très faible diamètre, en sorte que la vitesse u du liquide dans ces conduites est très supérieure à v_s et que par suite nous avons $v_o \simeq u$ et $y_a \simeq y$. Le coefficient d'entraînement caractérisant cet effet est $\lambda_o = \frac{v_o}{u_m}$. Lorsque λ_o est

supérieur à 1, $y_a < y$ entraînant $\Delta X < 0$, et pour $\lambda_o < 1$, $y_a > y$ d'où $\Delta X > 0$.

B - Changement de direction de la vitesse des microsphères.

Le vecteur vitesse $\vec{v}$ d'une microsphère est la somme vectorielle de la vitesse $\vec{u}$ du fluide au point considéré et de la vitesse de sédimentation $\vec{V}_s$. La direction générale de l'écoulement de la suspension étant verticale, donc parallèle à la direction de $\vec{V}_s$, le changement de direction de la

vitesse $\vec{v}$ de la particule par rapport à celle $\vec{u}$ du fluide sera d'autant plus important que celle-ci est plus inclinée sur la verticale, c'est-à-dire que la tortuosité à l'intérieur du garnissage est plus grande. Dans le cas simple du réseau de cylindres jointifs et en quinconce, les lignes de courant du liquide sont inclinées en moyenne à 45 degrés sur la verticale et nous avons représenté sur la figure n° 17 les différentes orientations possibles des vecteurs vitesses. Il apparaît sur cette figure que le changement de direction du vecteur vitesse $\vec{v}$ des microsphères par rapport au vecteur $\vec{u}$ favorise leur entrée dans les sites de cavernes lorsque le coefficient d'entraînement λ_0 est inférieur à 1.

Les deux effets de changements de direction et d'intensité de la vitesse des microsphères doivent donc entraîner une augmentation de la concentration X lorsque λ_0 est inférieur à 1 et une diminution lorsque λ_0 est supérieur à 1.

La concentration stationnaire de référence est celle obtenue en l'absence de sédimentation ($\lambda_0 = 1$).

Les résultats expérimentaux (voir tableau n° 2) confirment ces hypothèses sur le sens de variation de la concentration stationnaire X^* en fonction du coefficient λ_0 .

A ces variations de concentration correspondent de nouveaux taux de remplissage β calculables à partir de la relation; $\beta = \frac{X - y_a}{C_m} + y_a$ (49). Dans cette relation,

nous avons remplacé la concentration y de la suspension par la concentration $y_a = \frac{y}{\lambda_0}$ car lorsqu'il y a sédimentation

des microsphères tout se passe comme si nous faisons circuler une suspension de concentration y_a dans le réseau.

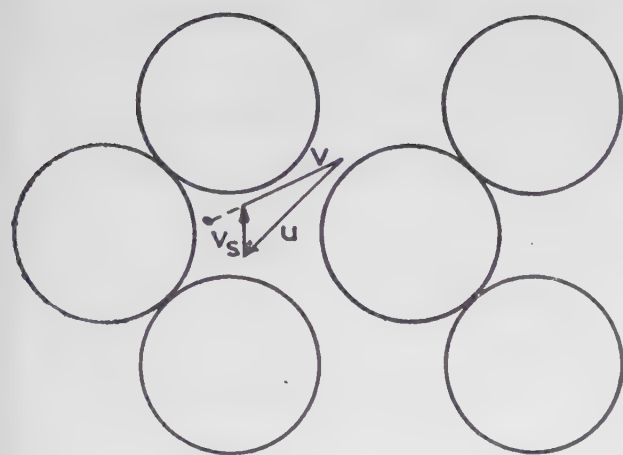
Nous avons de même calculé la fraction $\frac{\tau}{T_G}$ de temps durant

laquelle les microsphères séjournent dans les sites colmata-

bles :

$$\frac{\tau}{T_G} = 1 - \frac{y_a}{X^*} \quad (50)$$

CHANGEMENT D'ORIENTATION de la VITESSE d'une PARTICULE RESULTANT de sa SEDIMENTATION

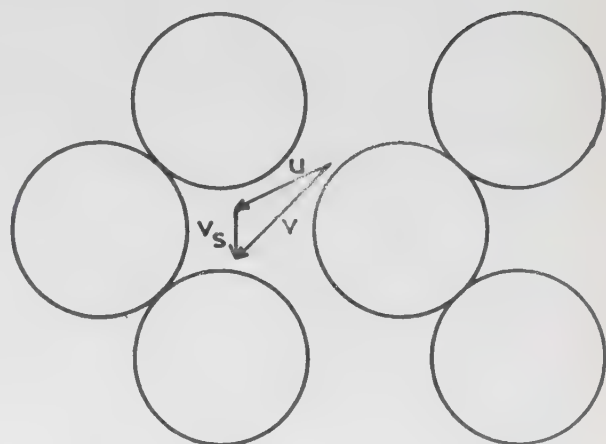


$$\rho_s - \rho_l < 0$$

$$v_0 < u$$

particules plus légères que
le liquide

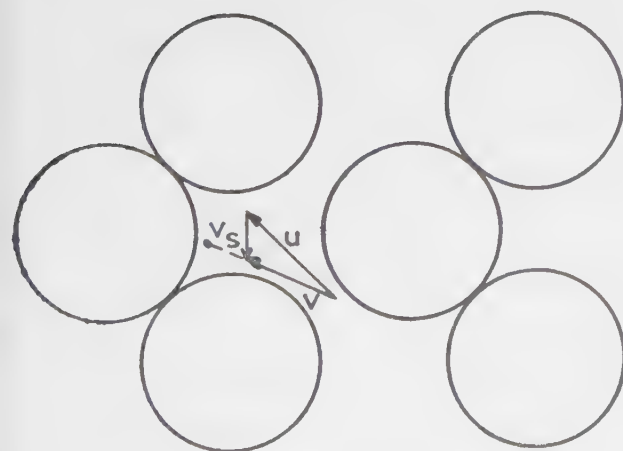
ECOULEMENT
DESCENDANT



$$\rho_s - \rho_l > 0$$

$$v_0 > u$$

particules plus lourdes
que le liquide

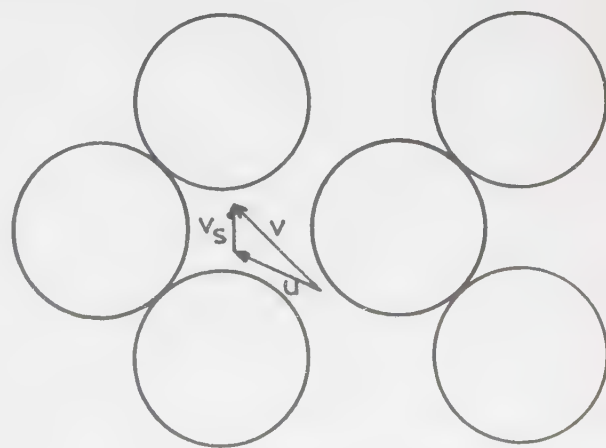


$$\rho_s - \rho_l > 0$$

$$v_0 < u$$

particules plus lourdes
que le liquide

ECOULEMENT
ASCENDANT



$$\rho_s - \rho_l < 0$$

$$v_0 > u$$

particules plus légères
que le liquide

Fig17

Les résultats rassemblés dans le tableau n° 2 montrent que si la sédimentation a une influence très nette sur le taux de remplissage des sites colmatables, elle n'entraîne, par contre, qu'une très faible variation de la fraction τ/T_G du temps que les particules séjournent dans ces sites.

On peut se demander si cette variation, en fonction de la différence $\rho_s - \rho_l$, du nombre de microsphères pénétrant dans les cavernes, ne serait pas due à l'inertie des microsphères lors des changements de direction des lignes de courant du liquide, plutôt qu'à l'action de la vitesse de sédimentation. Pour lever cette ambiguïté, évaluons l'importance relative de la force de pesanteur et de la force centrifuge s'exerçant sur une particule de volume v_1 . Le poids apparent de la particule étant $F_g = v_1 (\rho_s - \rho_l)g$ et la force centrifuge $F_c = v_1 (\rho_s - \rho_l) \cdot \frac{v^2}{r}$ (r rayon de courbure de la trajectoire), leur rapport vaut :

$$\frac{F_c}{F_g} = \frac{v^2}{r \cdot g} \quad (51)$$

Dans le cas particulier du réseau de cylindres, le rayon de courbure moyen des lignes de courant est de l'ordre de $\frac{\Phi + e}{2} = 0,2 \text{ cm}$ et la vitesse des microsphères

d'environ $0,5 \text{ cm/s}$. Nous avons $\frac{F_c}{F_g} = \frac{1}{800}$.

L'inertie des particules ne joue donc qu'un rôle négligeable vis-à-vis de la force de pesanteur pour les détourner des lignes de courant du liquide.

-Remarque : Cet effet d'inertie ne deviendrait réellement important que dans le cas de la filtration de particules en suspension dans un gaz où les vitesses d'écoulement sont nettement plus élevées (de l'ordre du mètre/seconde) et les rayons de courbure des trajectoires dans les milieux poreux utilisés (bourres de fibres textiles) plus faibles.

4.4. - Conclusion.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus avec les différents réseaux de cylindres nous a permis de mettre en évidence, d'une part, l'influence de la sédimentation sur le transport des particules vers les sites de rétention, d'autre part, la nécessité, en l'absence des forces d'adhérence, d'avoir un milieu poreux présentant des sites de rétreint et des sites de crevasse disposés normalement à la direction de l'écoulement pour qu'il y ait rétention permanente des particules par les forces d'origine mécanique. C'est dans ce but que nous avons étudié la rétention des microsphères d'une suspension s'écoulant à travers un empilement de sphères de verre.

C h a p i t r e V

Etude de la rétention de microsphères dans un empilement de sphères

51. Etude de la cinétique du phénomène de colmatage.

5.1.1. - Description et réversibilité du phénomène.

(Voir figure n° 18).

Si l'on fait circuler à débit constant Q une suspension de microsphères en concentration y constante à travers un empilement de sphères initialement exempt de particules, on constate dans un premier stade une augmentation rapide de la concentration X en microsphères et de la perte de charge ΔP à travers le milieu poreux.

Dans un deuxième stade, il y a une augmentation lente et plus faible de la concentration X . Après une durée de filtration de l'ordre de plusieurs heures, et sous certaines conditions (voir Remarque), il s'établit un régime stationnaire : la concentration X et la perte de charge gardent alors des valeurs constantes.

Cet état stationnaire ne peut que correspondre à l'égalité des vitesses des deux processus opposés de colmatage du milieu filtrant par dépôt des microsphères de la suspension et de décolmatage par réentraînement de ces mêmes microsphères par la suspension en écoulement.

Ceci est confirmé expérimentalement par la réversibilité du phénomène de colmatage. Comme nous le verrons au paragraphe 5.2.2., à chaque débit Q correspond une concentration stationnaire X^* qui est d'autant plus

CINETIQUE et REVERSIBILITE du COLMATAGE

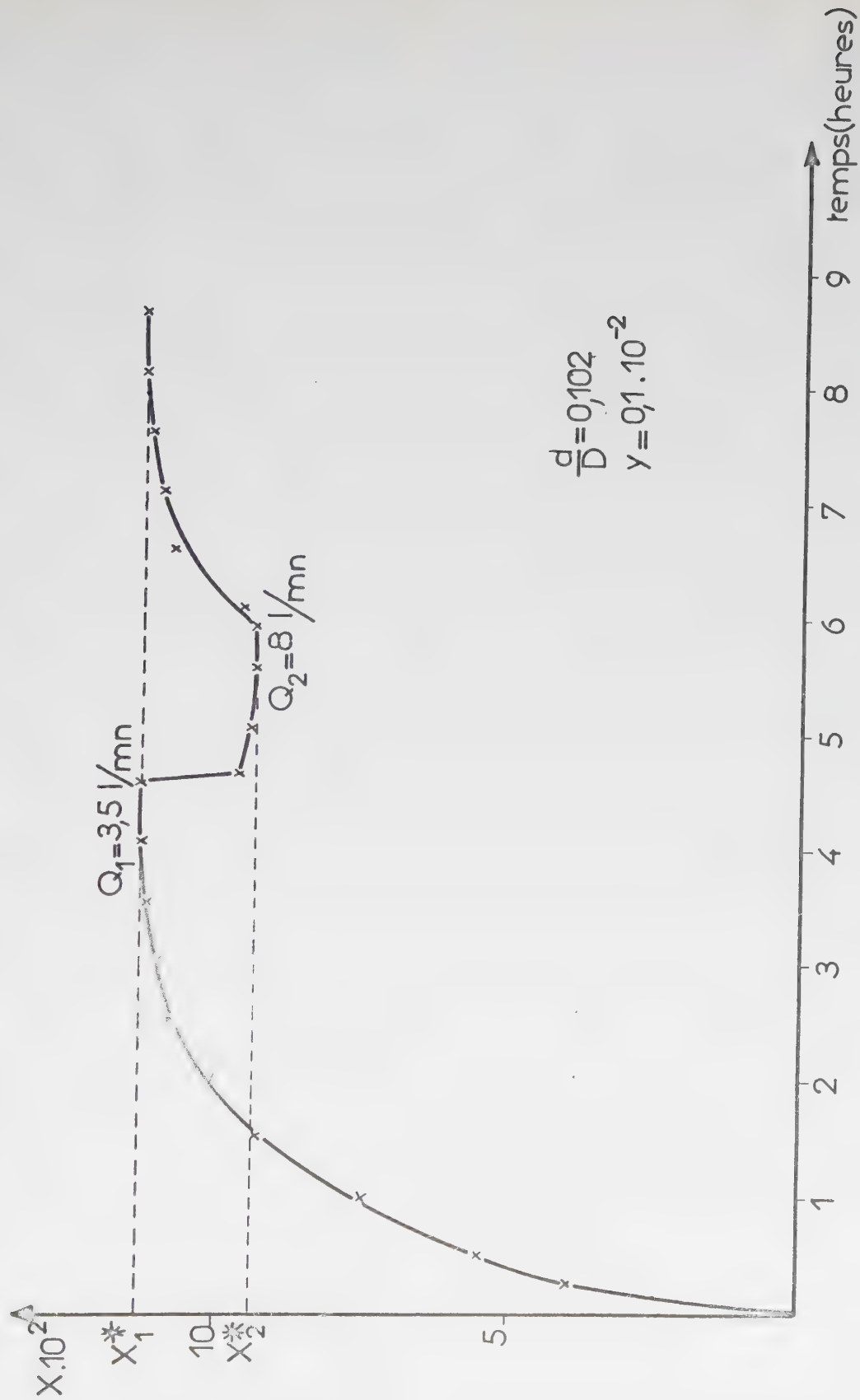


Fig 18

faible que le débit est plus grand. Si, après avoir atteint un état stationnaire caractérisé par les valeurs Q_1 et X_1^* , on augmente rapidement le débit à la valeur Q_2 , on constate, en premier lieu, une diminution très rapide de la concentration, qui tend ensuite plus lentement vers la nouvelle valeur stationnaire X_2^* correspondant au débit Q_2 .

Si l'on ramène rapidement le débit à sa valeur initiale

Q_1 , la concentration X revient très lentement à la valeur X_1^* (figure n° 18).

-Remarque : On notera que ce cycle réversible de colmatage et de décolmatage ne peut être observé que sous les deux conditions suivantes :

— Il faut que le rapport des diamètres $\frac{d}{D}$ soit inférieur à 0,12 (voir paragraphe 5.2.2.).

— Il existe, pour chaque milieu poreux, une concentration minimale irréversible X_i au-dessous de laquelle on ne peut descendre par augmentation du débit.

5.1.2. - Cinétique de la variation de concentration.

La vitesse apparente, V_a , de variation de la concentration, est la différence entre la vitesse réelle de colmatage V_c et la vitesse de décolmatage V_d .

$$V_a = \frac{dX}{dt} = V_c - V_d \quad (52)$$

Nous supposons que la vitesse réelle de colmatage V_c est proportionnelle, d'une part, à la concentration y de la suspension et, d'autre part, à la fraction $\epsilon_o \cdot (1-X)$ du volume total du milieu filtrant qui n'est pas colmatée;

$$V_c = k_c \cdot \epsilon_o \cdot (1-X) \cdot y \quad (53)$$

k_c est la constante de vitesse du colmatage.

Nous ferons, en outre, l'hypothèse que la vitesse de décolmatage est proportionnelle à la concentration, dans le milieu filtrant, en particules réentraînables :

$$V_d = k_d \cdot \epsilon_o \cdot (X - X_i) \quad (54)$$

k_d est la constante de vitesse du décolmatage.

La vitesse apparente a donc pour expression :

$$V_a = k_c \cdot \epsilon_o \cdot (1-X) \cdot y - k_d \cdot \epsilon_o \cdot (X - X_i) \quad (55)$$

Cette vitesse V_a , diminuant à mesure que le colmatage progresse, s'annule lorsque la concentration stationnaire X^* est atteinte;

$$V_a = 0 \text{ implique } V_c = V_d$$

$$\text{soit } k_c \cdot \epsilon_o \cdot (1-X^*)y = k_d \cdot \epsilon_o \cdot (X^* - X_i)$$

$$\text{d'où } \frac{k_d}{k_c} = \frac{y \cdot (1 - X^*)}{X^* - X_i} \quad (56)$$

Par élimination de la constante k_d entre les relations (55) et (56), nous obtenons :

$$V_a = k_c \cdot \varepsilon_o \cdot (1-X)y - k_c \frac{\varepsilon_o (1-X^*)y}{X^* - X_i} \cdot (X - X_i)$$

$$V_a = \frac{k_c \cdot \varepsilon_o \cdot y}{X^* - X_i} \cdot \left[(1-X)(X^* - X_i) - (X - X_i)(1 - X^*) \right]$$

$$V_a = \frac{k_c \cdot \varepsilon_o \cdot (1 - X_i)y}{X^* - X_i} \cdot (X^* - X)$$

$$\boxed{V_a = k_r \cdot (X^* - X)} \quad (57)$$

k_r est la constante de vitesse apparente du colmatage :

$$\boxed{k_r = \frac{k_c \cdot \varepsilon_o \cdot (1 - X_i)y}{X^* - X_i}} \quad (58)$$

De l'équation (57) nous déduisons :

$$\frac{dX}{X^* - X} = k_r \cdot dt \quad (59)$$

Au temps $t = 0$, la concentration a une valeur X_o ;
l'intégration de l'équation (59) conduit à :

$$\boxed{X = X^* - (X^* - X_o) \cdot e^{-k_r t}} \quad (60)$$

T_r étant la constante du temps du colmatage réversible dans la relation (60), les expressions des constantes de vitesse en fonction des données expérimentales sont :

$$k_r = \frac{1}{T_r} \quad (61)$$

$$k_c = \frac{X^* - X_i}{T_r \cdot \epsilon_0 \cdot (1 - X_i) y} \quad (62)$$

$$k_d = \frac{1 - X^*}{T_r \cdot \epsilon_0 \cdot (1 - X_i)} \quad (63)$$

5.1.3. - Résultats expérimentaux.

Les courbes expérimentales représentant la variation de la concentration X en fonction du temps (figure n° 18) ont bien l'allure exponentielle prévue par la relation théorique (60). Les constantes de temps, T_r , mesurées sont toujours très grandes (de l'ordre de plusieurs heures).

Les seules données expérimentales exploitables pour le calcul des différentes constantes de vitesse, ont été obtenues dans le cas où l'écart entre la concentration initiale X et la concentration stationnaire X^* était suffisamment élevé, donc pour les grandes valeurs du rapport $\frac{d}{D}$.

L'ensemble des résultats exploités est rassemblé dans le tableau n° 3 où nous avons porté, d'une part, les valeurs des constantes de vitesse k_c , k_d et k_r calculées à partir des relations (61), (62) et (63), d'autre part, les valeurs moyennes de ces constantes, avec l'écart type correspondant, pour une même valeur du rapport $\frac{d}{D}$.

Il apparaît que, pour une même valeur du rapport $\frac{d}{D}$

les différentes constantes de temps ne semblent pas être influencées par les deux autres paramètres expérimentaux la concentration y de la suspension et le débit de suspension Q .

Par contre, la constante de vitesse de colmatage k_c semble être une fonction croissante de $\frac{d}{D}$

$$\frac{d}{D} = 0,065 \quad (k_c)_m = 2,74 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{d}{D} = 0,083 \quad (k_c)_m = 8,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{d}{D} = 0,102 \quad (k_c)_m = 23,9 \cdot 10^{-3}$$

Les deux autres constantes k_d et k_r semblent être indépendantes de ce troisième paramètre d/D .

Cependant, ces résultats relatifs à la cinétique du colmatage par rétention mécanique sont trop peu nombreux et trop imprécis pour que nous puissions en déduire une conclusion définitive quant à la validité des équations proposées au paragraphe 5.1.2. En particulier, l'influence des divers paramètres expérimentaux sur les constantes de vitesse devra être précisée dans des études ultérieures.

TABLEAU N° 3

$$\frac{d}{D} = 0,065 \quad ; \quad \varepsilon_0 = 0,365 \quad ; \quad X_i = 0,69 \cdot 10^{-2}$$

$10^2 \cdot y$	0,05	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4
Re_σ	20	15	49	17,5	49	12,5
$10^2 \cdot X^*$	0,88	1,46	1,62	1,97	2,30	2,52
T_r en sec.	4 700	5 400	4 500	8 100	3 900	4 950
$10^3 \cdot k_c \text{ sec}^{-1}$	2,23	3,9	2,8	2,2	2,8	2,5
$10^4 \cdot k_d \text{ sec}^{-1}$	5,8	5	6	3,3	6,9	5,4
$10 \cdot k_r \text{ sec}^{-1}$	2,1	1,8	2,2	1	2,4	2

$$(k_c)_m = 2,74 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma = 0,56 \cdot 10^{-3}$$

$$(k_d)_m = 5,4 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma = 1,1 \cdot 10^{-4}$$

$$(k_r)_m = 1,92 \cdot 10^{-1}$$

$$\sigma = 0,45 \cdot 10^{-1}$$

$$\frac{d}{D} = 0,083 ; \quad \epsilon_0 = 0,385 ; \quad X_i = 0,94 \cdot 10^{-2}$$

$10^2 \cdot y$	0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4
Re_g	32	5	136	30	86	12	46	30
$10^2 \cdot X^*$	1,87	2,08	2,38	4,11	5	5,87	6,75	7,3
T_r en sec.	9 900	7 200	6 000	7 800	4 600	6 900	5 000	5 850
$10^3 \cdot k_c \text{ sec}^{-1}$	4,95	8,4	6,35	10,7	11,6	9,5	7,7	7,2
$10^4 \cdot k_d \text{ sec}^{-1}$	2,6	3,6	4,3	3,3	5,4	3,6	4,9	4,1
$10 \cdot k_r \text{ sec}^{-1}$	1	1,4	1,7	1,3	2,2	1,4	2	1,6

$$(k_c)_m = 8,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$(k_d)_m = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma = 0,8 \cdot 10^{-4}$$

$$(k_r)_m = 1,58 \cdot 10^{-1}$$

$$\sigma = 0,36 \cdot 10^{-1}$$

$$\frac{d}{D} = 0,102 ; \quad \epsilon_0 = 0,385 ; \quad \chi_i = 2,85 \cdot 10^{-2}$$

$10^2 \cdot y$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
Re_g	119	71,5	38	26	119	52,5	119	52,5	119
$10^2 \cdot X^*$	4,75	5,45	9,45	10,85	9,50	11,4	10,5	12,6	11,6
T_r en sec	3 300	3 600	5 100	6 600	3 600	3 300	6 300	3 000	4 200
$10^2 \cdot k_c \text{ sec}^{-1}$	1,5	1,9	3,4	3,2	2,5	3,6	1,1	2,9	1,4
$10^4 \cdot k_d \text{ sec}^{-1}$	7,7	7	4,7	3,6	6,7	7,1	3,8	7,8	5,6
$10 \cdot k_r \text{ sec}^{-1}$	3	2,8	2	1,5	2,8	3	1,5	3,3	2,4

$$(k_c)_m = 23,9 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma = 8,6 \cdot 10^{-3}$$

$$(k_d)_m = 6 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma = 1,5 \cdot 10^{-4}$$

$$(k_r)_m = 2,5 \cdot 10^{-1}$$

$$\sigma = 0,63 \cdot 10^{-1}$$

La seule conclusion certaine que nous pouvons déduire de cette étude est l'ordre de grandeur (plusieurs heures) de la constante de temps du colmatage. Celui-ci, très nettement supérieur au temps de mise en équilibre du colmatage d'un réseau de cylindres, est vraisemblablement dû au fait que, contrairement au cas du réseau de cylindres, il y a possibilité de rétention permanente des microsphères dans l'empilement de sphères.

Ceci fera l'objet d'une discussion au paragraphe 5.5.2.

52. Etude de l'état stationnaire.

5.2.1. - Analogie formelle avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir.

L'état stationnaire de rétention des microsphères est atteint lorsque les vitesses de colmatage et de décolmatage sont égales, soit :

$$k_c \cdot \varepsilon_o \cdot (1-X^*)y = k_d \cdot \varepsilon_o \cdot (X^* - X_i) \quad (64)$$

De cette équation, nous pouvons déduire l'expression de la concentration stationnaire :

$$X^* = \frac{X_i + K \cdot y}{1 + K \cdot y} \quad (65)$$

dans laquelle

$$K = \frac{k_c}{k_d} = \frac{X^* - X_i}{y(1-X^*)} \quad (66)$$

est la constante d'équilibre.

Il est intéressant de noter l'analogie entre cette équation (65) et la forme classique de l'isotherme d'adsorption de Langmuir. La concentration X^* tient le rôle de la concentration du soluté en phase adsorbée. La compétition entre les processus de colmatage et de décolmatage

est analogue à celle entre l'adsorption et la désorption; la turbulence du fluide en écoulement tient le rôle de la température, puisque ce paramètre favorise l'importance relative du décolmatage. Nous avons d'ailleurs déjà utilisé cette analogie en définissant au paragraphe 33 la vitesse moyenne v_m de migration des particules et le coefficient d'entraînement λ_m .

5.2.2. - Influence des divers paramètres expérimentaux sur la concentration stationnaire X^* .

L'ensemble de nos résultats expérimentaux est rassemblé dans le tableau n° 4. Nous avons étudié l'influence des trois principaux paramètres :

— Le rapport $\frac{d}{D}$ du diamètre des microsphères à celui des sphères constituant le garnissage a été varié de 0,022 à 0,12.

— Le débit de suspension Q variable dans un rapport de 1 à 30, nous a permis d'étudier l'influence du critère de Reynolds en régime turbulent, Re_g variant de 5 à 150.

— Nous avons fait varier la concentration volumique y de la suspension de $0,05 \cdot 10^{-2}$ à $0,4 \cdot 10^{-2}$.

Pour chaque groupe de valeurs de ces trois paramètres, les résultats sont exprimés sous quatre formes : la concentration stationnaire X^* qui est une donnée expérimentale et les trois grandeurs caractéristiques de chacun des modèles; le coefficient d'entraînement λ_m , le taux de remplissage β et la rétention C .

A. - Influence du rapport des diamètres $\frac{d}{D}$.

Cette influence est mise en évidence dans le réseau de courbes de X^* en fonction de $\frac{d}{D}$ obtenues pour une même

valeur du critère de Reynolds ($Re_g = 50$), mais avec différentes valeurs de la concentration y de la suspension (figure n° 19). Les courbes obtenues avec d'autres valeurs du critère de Reynolds sont analogues. Ces courbes représentatives de la fonction $X^* = f(\frac{d}{D})$ présentent deux zones bien distinctes :

a) Pour les rapports $\frac{d}{D} < 0,065$, la concentration stationnaire X^* est faible et ne croît que très légèrement en fonction du rapport $\frac{d}{D}$. Dans ce cas, il n'y a pratiquement pas de colmatage de l'empilement de sphères, mais plutôt ralentissement des microsphères par le milieu poreux. Nous n'avons effectué aucune expérience avec des rapports $\frac{d}{D}$ inférieurs à 0,02; il est cependant intéressant de remarquer que, pour cette dernière valeur, la concentration stationnaire X^* est encore environ trois fois plus grande que la concentration y de la suspension libre indiquant ainsi qu'il y a encore un ralentissement assez important des microsphères par le milieu filtrant.

b) Pour les valeurs de $\frac{d}{D}$ comprises entre 0,065 et 0,12, la concentration stationnaire est une fonction rapidement croissante du rapport $\frac{d}{D}$. C'est dans cette gamme de valeurs que le phénomène de colmatage réversible se manifeste avec le plus d'intensité.

Pour $\frac{d}{D}$ supérieur à 0,12, il n'est pas possible d'atteindre un régime d'équilibre stationnaire; on observe une augmentation constante et irréversible de la perte de charge et de la concentration en microsphères dans la partie amont du milieu filtrant.

Il faut noter que SUTHERLAND²⁴ avait aussi trouvé pour $\frac{d}{D}$, un rapport limite de l'ordre de 0,12, en étudiant la fluidisation de microsphères dans un garnissage de sphères.

INFLUENCE du RAPPORT des DIAMETRES $\frac{d}{D}$ sur le COLMATAGE

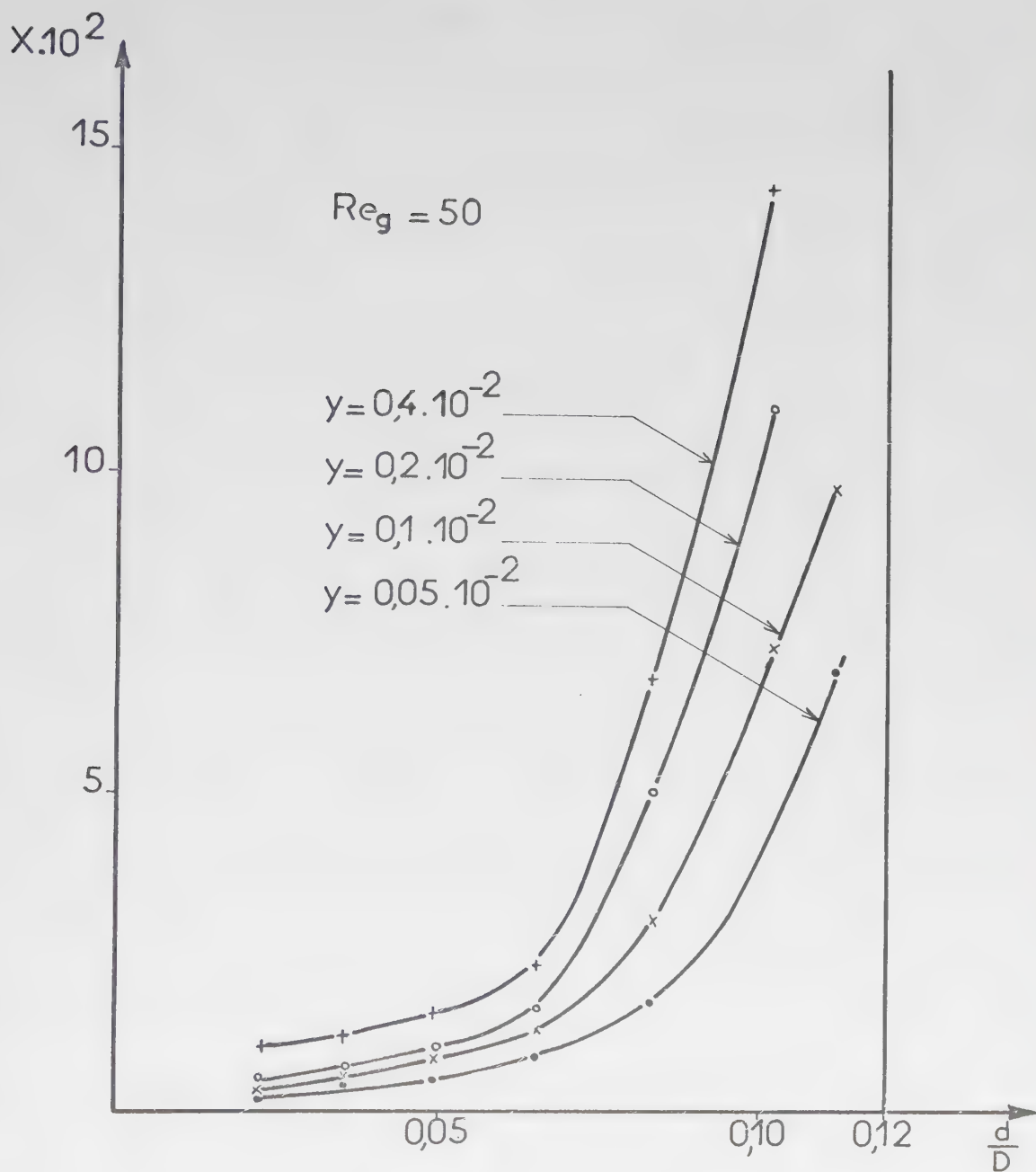


Fig 19

-Remarque : La limite supérieure au delà de laquelle il y a colmatage irréversible de l'empilement de sphères, peut s'interpréter en remarquant que la plus grosse microsphère que l'on puisse faire passer dans un rétrécissement de pore limité par trois sphères tangentes de diamètre D dont les centres sont situés aux sommets d'un triangle équilatéral, a pour diamètre $d = 0,154 D$. Il en résulte que, lorsque d est supérieur à cette valeur $0,154.D$, les microsphères sont bloquées irréversiblement dans un tel rétrécissement.

Comme nous le verrons au paragraphe 5.4., les rétrécissements de pore, dans les empilements de sphères que nous avons réalisés, étant en grande majorité du type ci-dessus, nous devrions trouver pour le rapport $\frac{d}{D}$ une limite supérieure de $0,154$. Or, nous avons constaté un colmatage irréversible du milieu filtrant pour des matériaux correspondant à une valeur moyenne du rapport $\frac{d}{D}$ de $0,122$. Cependant, la dispersion des diamètres des microsphères et des sphères entraînait une dispersion des valeurs du rapport $\frac{d}{D}$ entre la valeur minimale $0,10$ et la valeur maximale $0,136$ pour laquelle il y avait très vraisemblablement amorçage du colmatage irréversible. L'écart entre la valeur expérimentale $0,136$ et la valeur théorique $0,154$ est peut-être dû au fait que certaines microsphères ou sphères ne sont pas parfaitement sphériques.

B. - Influence du débit de la suspension.

La surface spécifique s_g étant égale à $\frac{6}{D}$ dans le cas d'un empilement de sphères de diamètre D , l'expression générale (38) du critère de Reynolds caractérisant le débit devient :

$$Re_g = u_o \cdot \frac{\rho \cdot D}{6 (1 - \epsilon) \eta} \quad (67)$$

Nous avons fait varier ce critère de Reynolds entre les valeurs 5 et 150. La valeur minimale $Re_g = 5$ correspond à un régime d'écoulement transitoire entre le régime laminaire et le régime turbulent. La valeur maximale, $Re_g = 150$, correspond à un régime turbulent bien établi.

La turbulence au sein de l'empilement de sphères favorisant le réentraînement des microsphères, nous constatons bien expérimentalement que la concentration stationnaire X^* est une fonction décroissante de Re_g (figures n° 20 et 21).

Pour les valeurs élevées de Re_g (supérieures à 75), correspondant à un écoulement turbulent bien établi, la concentration stationnaire atteint une valeur minimale constante.

C. - Influence de la concentration y de la suspension.

Les paramètres Re_g et $\frac{d}{D}$ étant fixés, l'augmentation de la concentration y de la suspension produit deux effets opposés sur le colmatage du milieu filtrant :

— D'une part, l'augmentation du nombre des chocs des particules en mouvement sur les particules préalablement captées favorise le réentraînement. Il en résulte, pour une microsphère pénétrant dans l'empilement de sphères, une probabilité plus faible d'y rester.

— D'autre part, un accroissement du nombre des microsphères pouvant être captées, ce qui tend, au contraire, à augmenter la concentration stationnaire.

Le deuxième effet est toutefois prépondérant puisque, malgré une diminution de la probabilité de rétention d'une particule, on observe expérimentalement que la concentration stationnaire est une fonction croissante de y (figure n°22).

Elle est d'autant plus rapidement croissante que l'on se rapproche du domaine de valeurs de $\frac{d}{D}$ où il y a colmatage irréversible.

INFLUENCE du DEBIT de la SUSPENSION sur le COLMATAGE

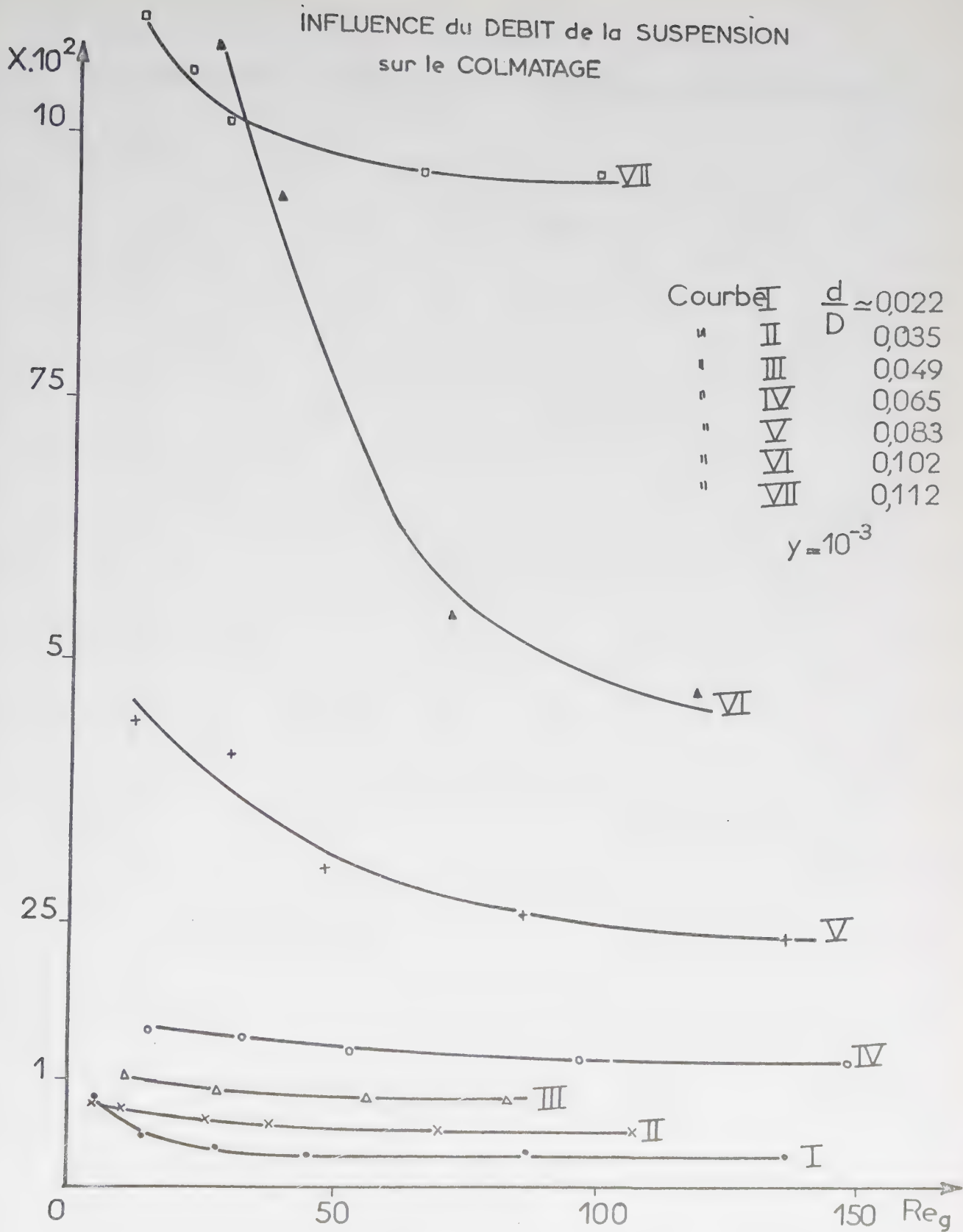


Fig 20

INFLUENCE du DEBIT de la SUSPENSION sur le COLMATAGE

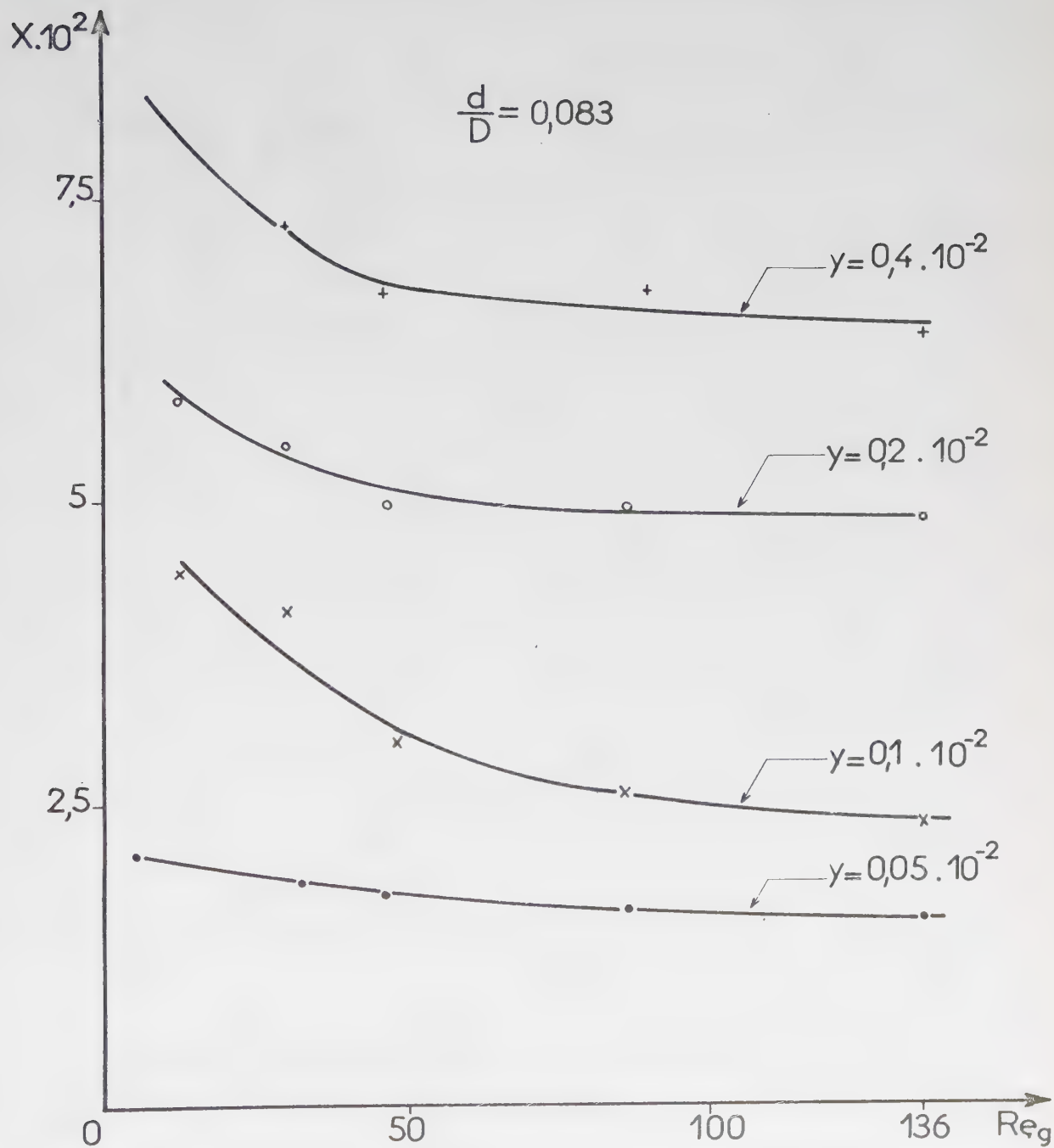


Fig 21

INFLUENCE de la CONCENTRATION de la SUSPENSION sur le COLMATAGE

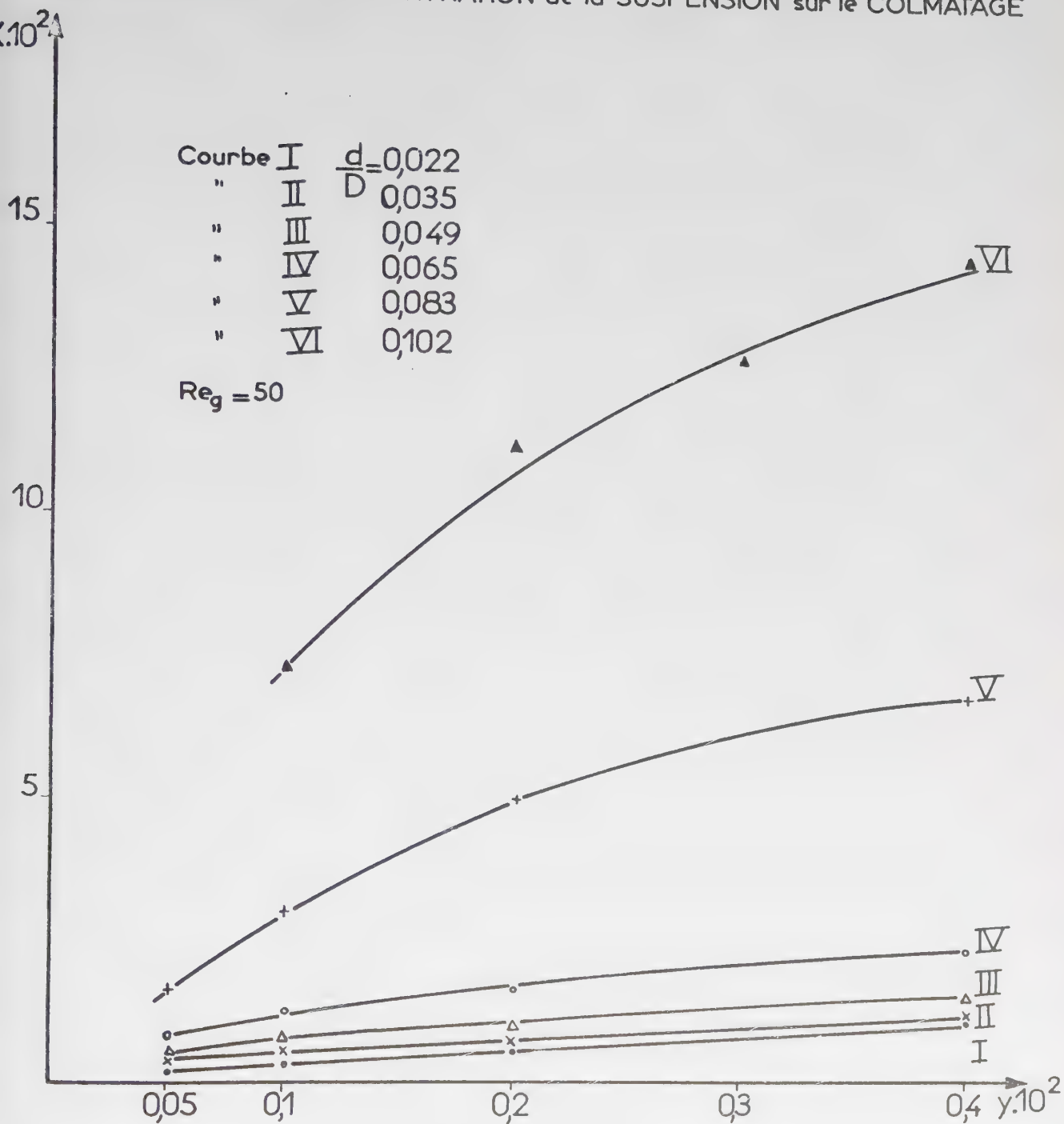


Fig 22

TABLEAU N° 4

$$\frac{d}{D} = 0,022$$

$$0,063 < d < 0,080 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,070 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,005 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,385$$

$$3,05 < D < 3,35 \text{ mm}$$

$$D_m = 3,20 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,072 \text{ mm}$$

$$X_i = 0,10 \cdot 10^{-2}$$

$v = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_g	5	12	30	48	88	136
	$X^* \cdot 10^2$	0,63	0,42	0,19	0,22	0,18	0,17
	λ	0,08	0,12	0,26	0,23	0,27	0,30
	$\beta \cdot 10^2$	1,63	1,07	0,44	0,52	0,41	0,38
	$C \cdot 10^2$	0,98	0,61	0,24	0,28	0,22	0,20
	$10^{-2} \cdot \Delta P \text{ (Pascals)}$				8,4	24	52
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,04	1,04	1,03
$v = 10^{-3}$	Re_g	5	14	28	45	87	136
	$X^* \cdot 10^2$	0,83	0,48	0,36	0,29	0,32	0,29
	λ	0,12	0,21	0,28	0,35	0,31	0,35
	$\beta \cdot 10^2$	2,12	1,15	0,82	0,63	0,71	0,63
	$C \cdot 10^2$	1,28	0,63	0,44	0,31	0,38	0,31
	$10^{-2} \cdot \Delta P \text{ (Pascals)}$				7,1	24,2	51,5
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,04	1,05	1,02
$y = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_g	5	16	23	48	90	
	$X^* \cdot 10^2$	1,54	0,87	0,57	0,56	0,54	
	λ	0,13	0,23	0,35	0,36	0,37	
	$\beta \cdot 10^2$	3,9	2,05	1,23	1,20	1,14	
	$C \cdot 10^2$	2,27	1,09	0,62	0,60	0,58	
	$10^{-2} \cdot \Delta P \text{ (Pascals)}$				8,5	25	
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,05	1,05	
$y = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_g	12	28	45	80		
	$X^* \cdot 10^2$	2	1,22	1,05	1,08		
	λ	0,20	0,33	0,38	0,37		
	$\beta \cdot 10^2$	4,8	2,65	2,2	2,28		
	$C \cdot 10^2$	2,78	1,36	1,11	1,13		
	$10^{-2} \cdot \Delta P \text{ (Pascals)}$			7,2	20		
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,06	1,05		

$$\frac{d}{D} = 0,035$$

$$0,080 < d < 0,100 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,090 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,006 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,385$$

$$2,40 < D < 2,70 \text{ mm}$$

$$D_m = 2,55 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,06 \text{ mm}$$

$$X_i = 0,32 \cdot 10^{-2}$$

$y = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_g	5	11	24	38	71	107
	$X^* \cdot 10^2$	0,72	0,70	0,63	0,50	0,42	0,38
	λ	0,07	0,07	0,08	0,10	0,12	0,13
	$\beta \cdot 10^2$	1,97	1,92	1,73	1,35	1,12	1
	$C \cdot 10^2$	1,16	1,08	0,92	0,78	0,63	0,58
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$				11,1	32,6	72
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,02	1,04	1,03
$v = 10^{-3}$	Re_g	5	10	26	38	70	107
	$X^* \cdot 10^2$	0,77	0,71	0,62	0,59	0,55	0,53
	λ	0,13	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19
	$\beta \cdot 10^2$	2,03	1,86	1,60	1,51	1,4	1,34
	$C \cdot 10^2$	1,16	1,06	0,90	0,79	0,77	0,70
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$				11,3	33,1	73,5
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,04	1,06	1,05
$y = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_g	7	8	25	38	70	107
	$X^* \cdot 10^2$	1,18	1,05	0,80	0,74	0,69	0,63
	λ	0,17	0,19	0,25	0,27	0,29	0,32
	$\beta \cdot 10^2$	3,03	2,65	1,92	1,76	1,61	1,44
	$C \cdot 10^2$	1,61	1,40	1,02	0,92	0,80	0,72
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$				11,2	32,8	72
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,03	1,05	1,03
$y = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_g	5	12	25	38	70	107
	$X^* \cdot 10^2$	1,74	1,66	1,29	1,22	1,18	1,08
	λ	0,23	0,24	0,31	0,33	0,34	0,37
	$\beta \cdot 10^2$	4,27	4,03	2,96	2,77	2,65	2,36
	$C \cdot 10^2$	2,28	1,92	1,47	1,37	1,30	1,14
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$				11,5	32,8	74,5
	$\Delta P / \Delta P_0$				1,06	1,05	1,06

$$\frac{d}{D} = 0,049$$

$$0,100 < d < 0,125 \text{ mm}$$

$$2,20 < D < 2,35 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,112 \text{ mm}$$

$$D_m = 2,28 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,007 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,047 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,365$$

$$X_i = 0,39 \cdot 10^{-2}$$

$y = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	11	28	55	83
	$X^* \cdot 10^2$	0,83	0,56	0,50	0,48
	λ	0,06	0,09	0,10	0,10
	$\beta \cdot 10^2$	2,45	1,62	1,43	1,37
	$C \cdot 10^2$	1,27	0,85	0,74	0,72
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$		9,8	31,7	68
	$\Delta P / \Delta P_0$		1,03	1,04	1,05
$y = 10^{-3}$	Re_{σ}	11	28	56	83
	$X^* \cdot 10^2$	1,02	0,89	0,83	0,84
	λ	0,10	0,11	0,12	0,12
	$\beta \cdot 10^2$	2,93	2,54	2,35	2,38
	$C \cdot 10^2$	1,52	1,32	1,20	1,22
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$		10	32	68,2
	$\Delta P / \Delta P_0$		1,05	1,05	1,06
$y = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	12	28	55	83
	$X^* \cdot 10^2$	1,57	1,14	0,99	0,85
	λ	0,14	0,18	0,20	0,21
	$\beta \cdot 10^2$	4,42	3,1	2,53	2,2
	$C \cdot 10^2$	2,10	1,57	1,31	1,27
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$		10	32,2	67
	$\Delta P / \Delta P_0$		1,05	1,06	1,04
$y = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	11	28	55	83
	$X^* \cdot 10^2$	2,22	1,74	1,51	1,51
	λ	0,18	0,23	0,27	0,27
	$\beta \cdot 10^2$	6	4,52	3,82	3,82
	$C \cdot 10^2$	3,04	2,23	1,84	1,84
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$		10,2	32,2	69
	$\Delta P / \Delta P_0$		1,07	1,06	1,07

$$\frac{d}{D} = 0,065$$

$$0,220 < d < 0,250 \text{ mm}$$

$$3,45 < D < 3,70 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,235 \text{ mm}$$

$$D_m = 3,59$$

$$\sigma_d = 0,012 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,07 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,365$$

$$X_i = 0,69 \cdot 10^{-2}$$

$\nu = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_g	20	32,5	50	84	148
	$X^* \cdot 10^2$	0,88	0,81	0,78	0,81	0,80
	λ	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	$\beta \cdot 10^2$	2,65	2,42	2,32	2,42	2,39
	$C \cdot 10^2$	1,38	1,27	1,22	1,27	1,24
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			7,2	17,5	50
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,06	1,07	1,05
$\nu = 10^{-3}$	Re_g	15	32,5	53	97	148
	$X^* \cdot 10^2$	1,46	1,40	1,28	1,20	1,19
	λ	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
	$\beta \cdot 10^2$	4,33	4,15	3,8	3,53	3,5
	$C \cdot 10^2$	2,28	2,17	1,95	1,84	1,82
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			8,2	23,2	50,5
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,06	1,07	1,06
$\nu = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_g	17,5	34	49	97	148
	$X^* \cdot 10^2$	1,97	1,66	1,62	1,62	1,56
	λ	0,10	0,12	0,12	0,12	0,13
	$\beta \cdot 10^2$	5,7	4,75	4,62	4,62	4,45
	$C \cdot 10^2$	2,95	2,43	2,37	2,37	2,28
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			7,3	23,5	51,5
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,07	1,08	1,08
$\nu = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_g	12,5	32,5	49	87,5	148
	$X^* \cdot 10^2$	2,52	2,34	2,30	2,14	2,14
	λ	0,16	0,17	0,17	0,19	0,19
	$\beta \cdot 10^2$	7	6,45	6,32	5,83	5,83
	$C \cdot 10^2$	3,54	3,25	3,17	2,90	2,90
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			8,8	20,8	52,4
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,29	1,18	1,10

$$\frac{d}{D} = 0,083$$

$$0,250 < d < 0,280 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,265 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,007 \text{ mm}$$

$$\epsilon_0 = 0,385$$

$$3,05 < D < 3,35 \text{ mm}$$

$$D_m = 3,20 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,072 \text{ mm}$$

$$X_j = 0,94 \cdot 10^{-2}$$

$\nu = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	5	32	46	86	136
	$X^* \cdot 10^2$	2,08	1,87	1,76	1,61	1,56
	λ	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
	$\beta \cdot 10^2$	5,67	5,07	4,8	4,36	4,22
	$C \cdot 10^2$	3,4	3,04	2,87	2,60	2,52
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			13,4	28,3	52,1
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,38	1,10	1,05
$\nu = 10^{-3}$	Re_{σ}	12	30	48	86	136
	$X^* \cdot 10^2$	4,43	4,11	3,02	2,6	2,38
	λ	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
	$\beta \cdot 10^2$	12,1	11,2	8,4	7	6,4
	$C \cdot 10^2$	7,2	6,65	4,86	4,16	3,81
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			13,8	34,5	53
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,33	1,34	1,07
$\nu = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	12	30	46	86	136
	$X^* \cdot 10^2$	5,87	5,50	5	5	4,92
	λ	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
	$\beta \cdot 10^2$	15,8	14,9	13,5	13,5	13,3
	$C \cdot 10^2$	9,45	8,85	8	8	7,8
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			14,6	40	70,5
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,50	1,55	1,43
$\nu = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_{σ}	7	30	46	90	136
	$X^* \cdot 10^2$	8,4	7,3	6,75	6,8	6,45
	λ	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06
	$\beta \cdot 10^2$	22,5	19,5	18	18,1	17,2
	$C \cdot 10^2$	13,3	11,4	10,6	10,5	10,05
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			16,5	52,5	87
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,70	1,95	1,76

$$\frac{d}{D} = 0,102$$

$$0,315 < d < 0,340 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,327 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,012 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,385$$

$$3,05 < D < 3,35 \text{ mm}$$

$$D_m = 3,20 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,072 \text{ mm}$$

$$X_j = 2,45 \cdot 10^{-2}$$

$y = 10^{-3}$	Re_g	26	38	71,5	119
	$X^* \cdot 10^2$	10,85	9,45	5,45	4,75
	λ	0,01	0,01	0,02	0,02
	$\beta \cdot 10^2$	30	26	15	13
	$C \cdot 10^2$	17,8	15,5	8,9	7,75
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			27,2	54,7
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,64	1,41
$y = 2 \cdot 10^{-3}$	Re_g	26	52,5	73	119
	$X^* \cdot 10^2$	16,9	11,4	9,85	9,50
	λ	0,01	0,02	0,02	0,02
	$\beta \cdot 10^2$	46,5	31,2	27	26
	$C \cdot 10^2$	27,8	18,7	16,1	15,05
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$		30,4	36,6	87
	$\Delta P / \Delta P_0$		2,76	2,2	2,25
$y = 3 \cdot 10^{-3}$	Re_g	52,5	73	119	
	$X^* \cdot 10^2$	12,6	11,5	10,5	
	λ	0,02	0,03	0,03	
	$\beta \cdot 10^2$	34,5	31,5	28,6	
	$C \cdot 10^2$	20,4	18,6	17	
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$	31,5	47,7	98	
	$\Delta P / \Delta P_0$	2,87	2,87	2,53	
$y = 4 \cdot 10^{-3}$	Re_g	46	73	119	
	$X^* \cdot 10^2$	14,6	12,9	11,6	
	λ	0,03	0,03	0,03	
	$\beta \cdot 10^2$	39,8	35	31,5	
	$C \cdot 10^2$	23,5	20,8	18,6	
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$	36	55,2	116,5	
	$\Delta P / \Delta P_0$	3,7	3,32	3	

$$\frac{d}{D} = 0,112$$

$$0,250 < d < 0,280 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,265 \text{ mm}$$

$$\sigma_d = 0,007 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_0 = 0,375$$

$$2,25 < D < 2,50 \text{ mm}$$

$$D_m = 2,37 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,05 \text{ mm}$$

$$X_i = 5,65 \cdot 10^{-2}$$

$\nu = 0,5 \cdot 10^{-3}$	Re_g	12	24	32	65	99
	$X^* \cdot 10^2$	8,12	7,45	7	6,85	7,05
	$\lambda \cdot 10^2$	0,02	0,07	0,07	0,07	0,07
	$\beta \cdot 10^2$	23,5	21,5	20	19,8	20,2
	$C \cdot 10^2$	13,5	12,6	11,9	11,5	12
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			19,6	62	150
	$\Delta P / \Delta P_0$			1,92	1,82	2
$\nu = 10^{-3}$	Re_g	12	20,5	28	65	99
	$X^* \cdot 10^2$	11,1	10,6	10,15	9,7	9,7
	$\lambda \cdot 10^2$	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
	$\beta \cdot 10^2$	31,8	30,5	29,2	27,8	27,8
	$C \cdot 10^2$	19,2	18	17,2	16,5	16,5
	$\Delta P \cdot 10^{-2}$			20,5	75	
	$\Delta P / \Delta P_0$			2,5	2,20	

55. Etude du lavage d'un empilement de sphères partiellement colmaté.

5.3.1 - Processus expérimental et description du phénomène.

Avec l'appareil permettant une alimentation discontinue en suspension (figure n° 4), nous avons réalisé un colmatage partiel de l'empilement de sphères par une suspension de concentration constante y en microsphères, s'écoulant sous une pression constante. Après cette période de colmatage, d'une durée de dix minutes, nous arrêtons l'écoulement de la suspension et réalisons une circulation de liquide pur, qui a le même sens d'écoulement, dans la cellule de filtration, que la suspension (lavage à co-courant).

Ce lavage s'effectue à débit constant en commençant par les débits les plus faibles, puis en augmentant ce débit par paliers (voir Remarque) jusqu'au débit maximal réalisable avec notre installation. Nous inversons ensuite le sens de l'écoulement du liquide pur (lavage à contre-courant) et réaugmentons le débit par paliers.

Cet effet de lavage de l'empilement de sphères est mis en évidence en traçant les courbes représentant la concentration X en fonction du débit de liquide du lavage, caractérisé par le critère de Reynolds Re_g .

L'allure des courbes expérimentales est fonction de la valeur du rapport des diamètres $\frac{d}{D}$ (voir figure n° 23). Nous avons cependant constaté, dans tous les cas, l'existence d'une concentration irréversible après lavage à co-courant X_{i1} et d'une autre concentration irréversible, plus faible, X_{i2} , après un lavage à contre-courant.

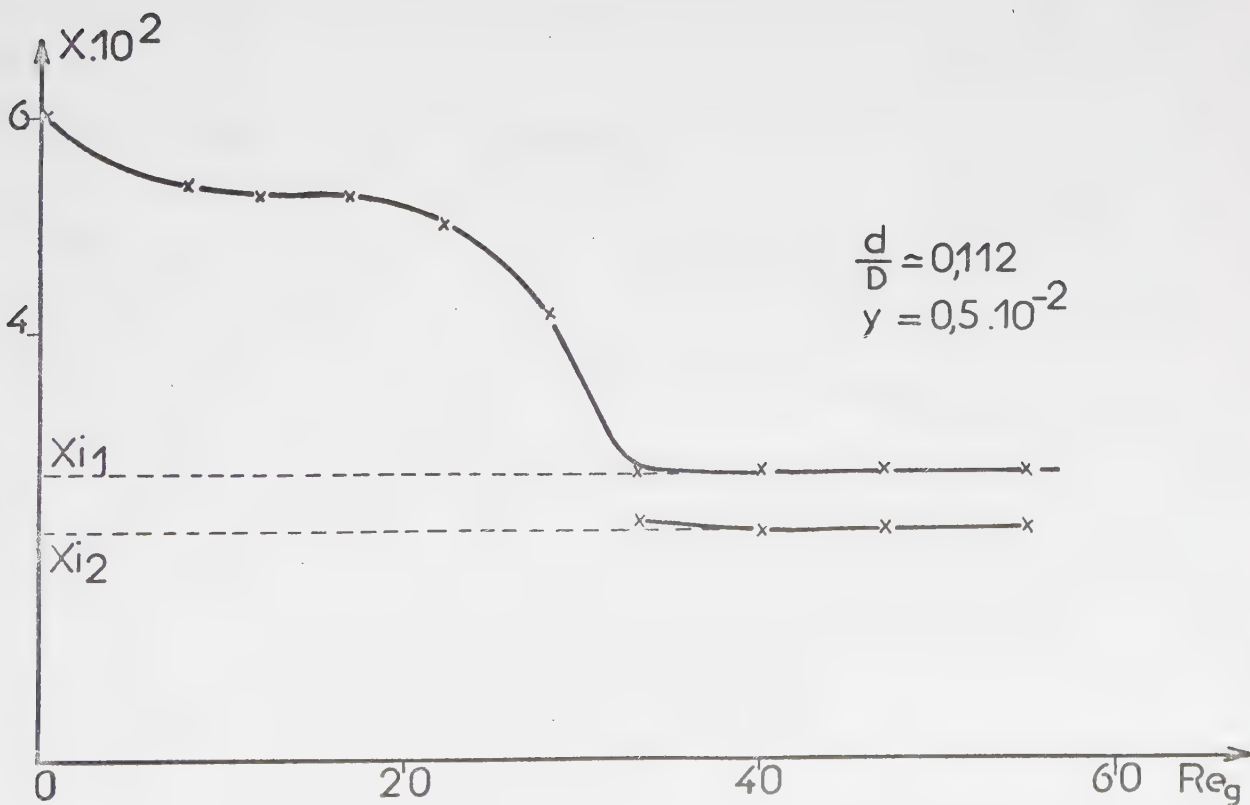
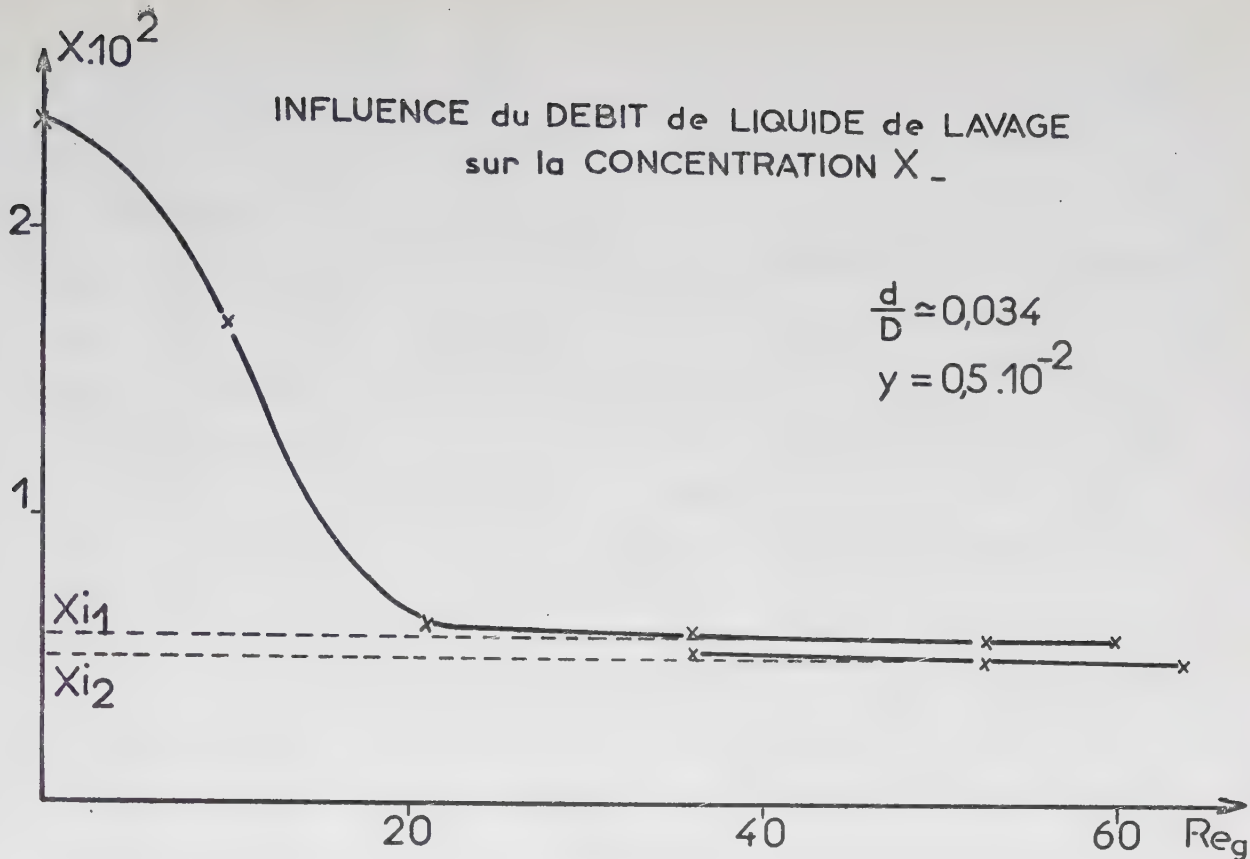


Fig 23

-Remarques :

1) Le colmatage préalable de l'empilement de sphères ayant été réalisé avec des suspensions de concentration élevée ($y = 10^{-2}$) circulant sous une pression constante, les concentrations X dans le milieu filtrant, après la période de colmatage, ne sont pas comparables aux concentrations stationnaires X^* obtenues pour la même valeur du rapport $\frac{d}{D}$ en faisant circuler à débit constant des suspensions de concentration plus faible ($y = 10^{-3}$).

2) A un débit donné, nous poursuivons le lavage jusqu'à ce que la concentration X en microsphères atteigne une valeur constante. Une fois celle-ci atteinte, nous augmentons très lentement le débit, afin de ne pas détruire par une accélération trop brutale l'empilement des microsphères, jusqu'à une nouvelle valeur fixe.

5.3.2. - Résultats expérimentaux.

Nous avons étudié le lavage pour deux valeurs très différentes (0,034 et 0,112) du rapport des diamètres $\frac{d}{D}$. Pour chacune de ces valeurs, le colmatage préalable a été réalisé avec trois suspensions de concentrations différentes ($0,5 \cdot 10^{-2}$; 10^{-2} et $2 \cdot 10^{-2}$). Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau n° 5.

Lorsque le rapport des diamètres $\frac{d}{D}$ est faible (0,034), le réentraînement des microsphères s'amorce, même pour les faibles débits de liquide de lavage (voir figure n° 23). L'inversion du sens de l'écoulement du liquide n'entraîne qu'un faible abaissement, $X_{11} - X_{12}$, de la concentration irréversible dans le milieu filtrant.

Dans le cas où le rapport $\frac{d}{D}$ est grand (0,112) le réentraînement des microsphères ne devient important que pour des débits de liquide de lavage suffisamment grands. L'inversion du sens de l'écoulement du liquide provoque un réentraînement supplémentaire, $X_{i1} - X_{i2}$, sensiblement plus important dans le cas précédent.

Nous donnerons, au paragraphe 5513, une interprétation de l'ordre de grandeur de ces concentrations irréversibles après lavage par un liquide pur.

Cette interprétation est basée sur le modèle à cavernes et à rétreints que nous exposons au paragraphe suivant.

-Remarque : Nous avons également réalisé quelques expériences de lavage avec des matériaux tels que le rapport $\frac{d}{D}$ était égal à 0,0915. Dans ce cas, nous avons obtenu des résultats ayant une mauvaise reproductibilité. Nous essaierons, au paragraphe 5514, d'expliquer cette irreproductibilité.

TABLEAU N° 5

Notations : - y est la concentration de la suspension ayant réalisé le colmatage préalable

- sens d'écoulement du liquide pur : lavage à co-courant $\uparrow$
lavage à contre-courant $\downarrow$

- Re_g : nombre de Reynolds caractérisant le débit du liquide du lavage

$$\frac{d}{D} = 0,034$$

$$d_m = 0,077 \text{ mm}$$

$$D_m = 2,28 \text{ mm}$$

$$\epsilon_0 = 0,37$$

$$\sigma_d = 0,011 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,05 \text{ mm}$$

	Re_g	0	10	21	36	52,5	60	64
$y = 0,5 \cdot 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	2,37	1,69	0,63	0,61	0,59	0,59	
	$\downarrow 10^2 \cdot X$				0,54	0,52		0,51
$y = 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	2,85	1,66	0,81	0,70	0,65	0,63	
	$\downarrow 10^2 \cdot X$				0,51	0,50		0,485
$y = 2 \cdot 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	3,97	1,89	1,20	0,57	0,54	0,54	
	$\downarrow 10^2 \cdot X$				0,43	0,42		0,42

$$\frac{d}{D} = 0,112$$

$$d_m = 0,256 \text{ mm}$$

$$D_m = 2,28 \text{ mm}$$

$$\epsilon_0 = 0,37$$

$$\sigma_d = 0,013 \text{ mm}$$

$$\sigma_D = 0,05 \text{ mm}$$

	Re_g	0	8	12	17	22	28	33	40	47	55
$y = 0,5 \cdot 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	6	5,4	5,3	5,3	5,05	4,2	2,73	2,73	2,73	2,73
	$\downarrow 10^2 \cdot X$							2,27	2,21	2,21	2,21
$y = 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	7,2	7,2	7,2	7,2	7,4	6,8	6,45	6,35	6,35	6,35
	$\downarrow 10^2 \cdot X$						4,37	4,3	4,25	4,25	4,25
$y = 2 \cdot 10^{-2}$	$\uparrow 10^2 \cdot X$	15,2	13	12	7,45	7,7	6,2	5,9	5,9	5,9	5,9
	$\downarrow 10^2 \cdot X$							4,8	4,7	4,65	4,62

54. Le modèle à cavernes et à rétreints.

Comme nous le verrons au paragraphe 56, le modèle de faisceau de pores de Kozeny est une mauvaise représentation d'un empilement de sphères partiellement colmaté. Par contre, divers auteurs à la suite de CHILDS et COLLIS George²⁵, ainsi que MARSHALL²⁶ ont présenté des modèles statistiques donnant d'un milieu poreux une représentation beaucoup plus conforme à la réalité que le modèle de Kozeny.

En nous inspirant du modèle proposé par MARSHALL²⁶, nous représenterons un empilement désordonné de grains sphériques comme un arrangement régulier cubique de cubes d'arête z_1 dont chacun contient un et un seul centre de sphère dont la position est quelconque à l'intérieur de chaque cube. En joignant les centres des sphères tangentes situées dans une même couche de cubes, nous obtenons une mosaïque matérialisant ce que nous appellerons un "feuillet".

L'ensemble du lit poreux peut être représenté par la superposition de N feuillets avec $N = \frac{Z}{z_1}$ (Z est l'épaisseur totale du milieu poreux.)

Nous remplaçons donc la notion de pore cylindrique par une succession de "rétreints", à la traversée de chaque feuillet séparés par des "cavernes" situées entre les feuillets.

L'arête du cube élémentaire a une longueur z_1 qui se calcule aisément à partir de la porosité ϵ_0 et du diamètre D des grains sphériques :

$$z_1 = D \cdot \left(\frac{\pi}{6 (1 - \epsilon_0)} \right)^{1/3} \quad (68)$$

- Exemple : Pour un empilement d'environ 3.650 sphères de 0,32 cm de diamètre, réalisé dans un cylindre de 4,6 cm de diamètre et de hauteur $Z = 6,2$ cm, nous avons mesuré sur une

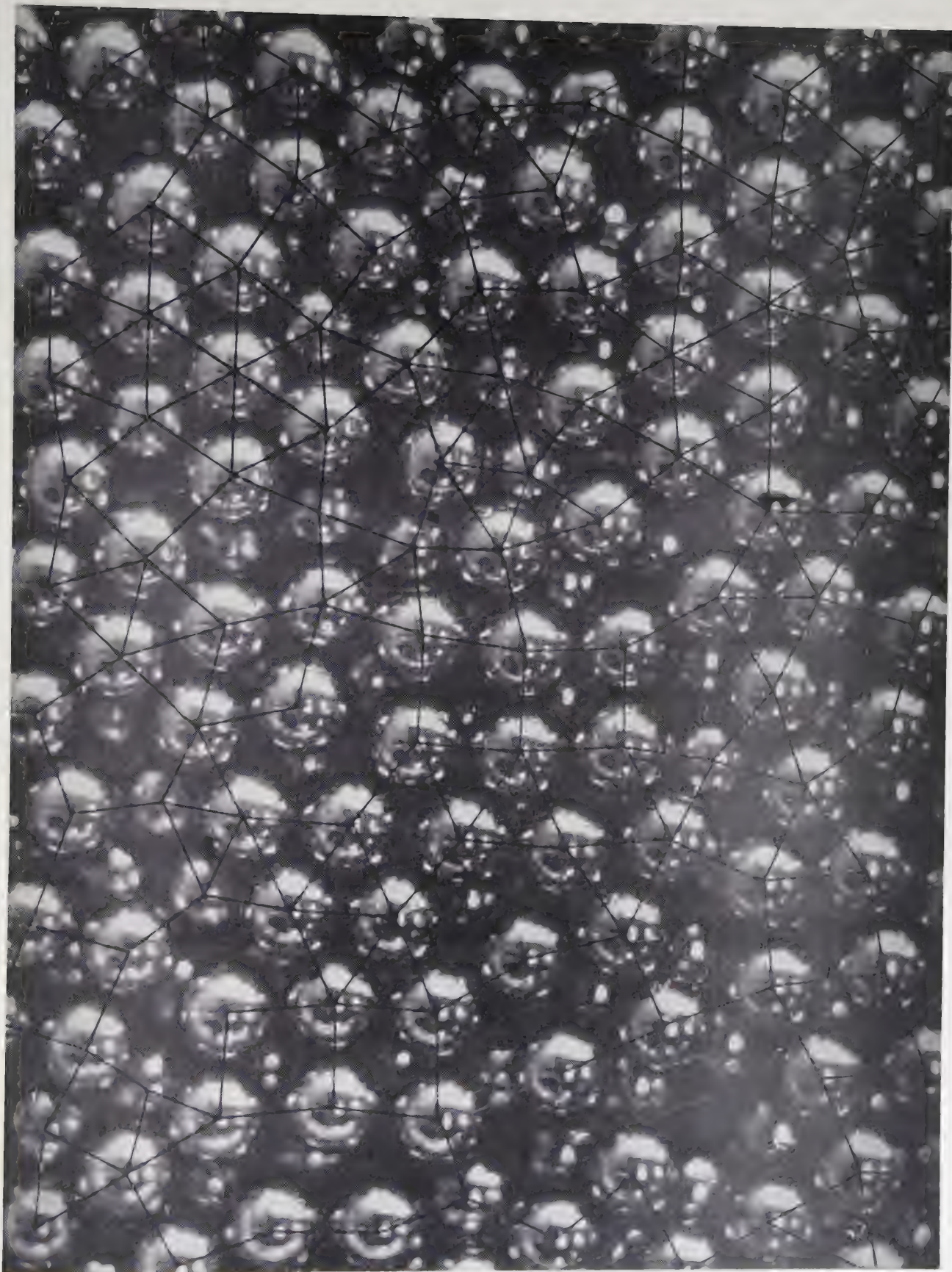
moyenne de 8 empilements, une porosité initiale $\varepsilon_0 = 0,385$ et une superposition moyenne de 22,75 feuillets mosaïques correspondant à une dimension $z_1 = 0,273$ cm pour l'arête du cube élémentaire.

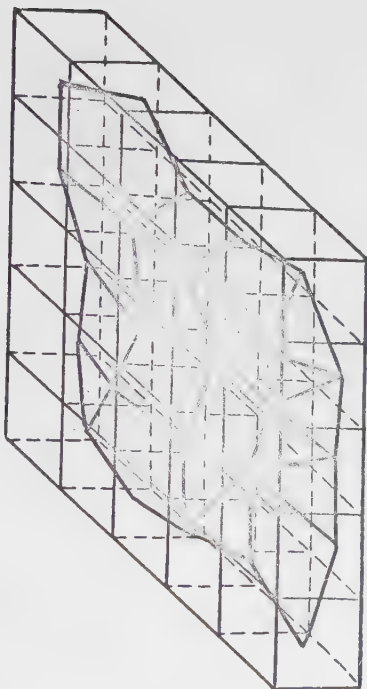
L'examen de photographies de surface d'empilement de sphères, semblables à celle représentée sur la figure n° 24, nous montre que la mosaïque matérialisant un "feuillet" est constituée de polygones gauches obtenus en joignant les centres des sphères tangentes. Le plus grand nombre de ces polygones sont des losanges dont le petit angle varie de 60 à 90 degrés. Dans l'étude statistique de la répartition des polygones, suivant le nombre de leurs côtés, nous classerons les losanges gauches dans l'une des deux catégories extrêmes suivantes : le rétreint carré R_4 et le losange constitué par deux rétreints triangulaires R_3 accolés.

Cette répartition mesurée sur mille rétreints est donnée dans la deuxième colonne du tableau n° 6.

Tableau n° 6

Nature des rétreints	%	%
R_3 triangulaires	72,8	75
R_4 carrés	19	19,5
R_5 pentagonaux	5,4	5,5
R_6 hexagonaux	1,9	0
R_7 heptagonaux	0,5	0
R_8 octogonaux	0,4	0

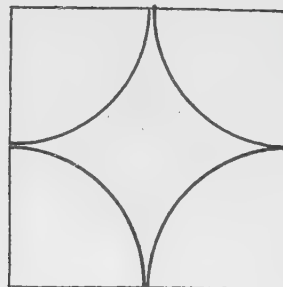




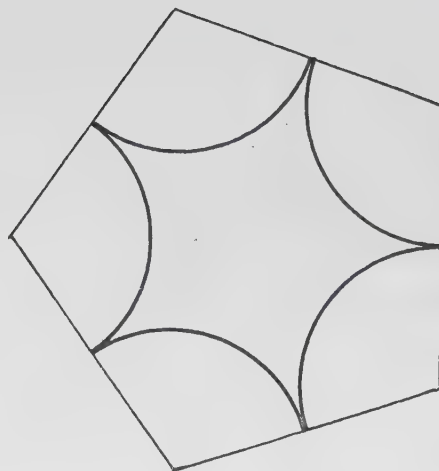
Maillet Boîte



Retrait Triangulaire R_3
 $S_{R_3} = 0,0117$



Retrait Carré R_4
 $S_{R_4} = 0,2151$



Retrait Pentagonal R_5
 $S_{R_5} = 0,5451$

On peut admettre, sans grande erreur, qu'un feuillet à l'intérieur du milieu poreux ne contient que des rétreints R_3 , R_4 et R_5 , les rétreints R_6 , R_7 et R_8 étant comblés par des sphères des feuillets voisins pour se subdiviser en rétreints R_3 , R_4 et R_5 . Les pourcentages donnés dans la troisième colonne du tableau n° 6 ont été calculés à partir de ceux de la deuxième colonne en faisant cette hypothèse.

Dans chaque feuillet, la surface libre S_L offerte pour l'écoulement du fluide a pour expression :

$$S_L = n_3 \cdot S_{R_3} + n_4 \cdot S_{R_4} + n_5 \cdot S_{R_5} \quad (69)$$

n_3 , n_4 et n_5 sont les nombres de rétreints de chaque type dont les surfaces respectives se calculent par des considérations géométriques élémentaires, soit :

$$S_{R_3} = 0,042 \cdot D^2 \quad S_{R_4} = 0,215 \cdot D^2 \quad S_{R_5} = 0,545 \cdot D^2$$

En assimilant chaque feuillet mosaïque à un plan, nous pouvons calculer les nombres absolus de rétreints de chaque type dans un feuillet.

En effet, le nombre total N_S de sphères dans le milieu filtrant est :

$$N_S = \frac{6 \cdot Z \cdot S (1 - \epsilon_0)}{\pi \cdot D^3} \quad (70)$$

dans un feuillet il y en a :

$$\frac{N_S}{N} = \frac{6 \cdot Z \cdot S (1 - \epsilon_0)}{N \cdot \pi \cdot D^3}$$

S étant la surface de la section droite du milieu filtrant, la surface libre S_L a pour expression :

$$S_L = S - \frac{N_S}{N} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = S - \frac{3}{2} \cdot \frac{Z \cdot S \cdot (1 - \epsilon_0)}{N \cdot D}$$

En reportant cette valeur de S_L dans la relation (69) nous obtenons :

$$S - \frac{3}{2} \cdot \frac{Z.S (1 - \varepsilon_0)}{N \cdot D} = n_3 \cdot \left[S_{R_3} + \frac{n_4}{n_3} \cdot S_{R_4} + \frac{n_5}{n_3} \cdot S_{R_5} \right] \quad (71)$$

Les rapports $\frac{n_4}{n_3}$ et $\frac{n_5}{n_3}$ étant déterminés à partir de

l'étude statistique sur le nombre de rétreints, nous pouvons calculer le nombre n_3 de rétreints triangulaires dans un feuillet et ensuite les nombres n_4 et n_5 .

Dans l'exemple cité précédemment de l'empilement contenant 3.650 sphères, on trouve de cette façon :

$$n_3 = 274 \quad n_4 = 71 \quad n_5 = 20.$$

Nous ferons l'hypothèse que les sites colmatables dans un tel modèle sont les sites de cavernes placés en amont des rétreints R_3 , R_4 et R_5 . Comme le montre la figure n° 26, ces cavernes sont délimitées par les sphères formant le rétreint, le plan diamétral commun à ces sphères et leur plan tangent commun. Leurs volumes sont respectivement :

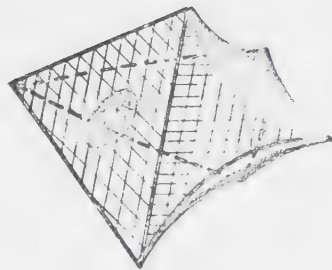
$$V_{R_3} = 0,085 \cdot D^3 \quad V_{R_4} = 0,238 \cdot D^3 \quad V_{R_5} = 0,34 \cdot D^3.$$

Mais, l'espacement moyen z_1 des feuillets étant inférieur au diamètre D , il y a interpénétration des couches de sphères sur une hauteur $D - z_1$.

Le volume colmatable en amont de chacun des rétreints sera donc diminué du volume v_c de la calotte sphérique de hauteur $D - z_1$ qui représente la pénétration dans la caverne des sphères du feuillet voisin :

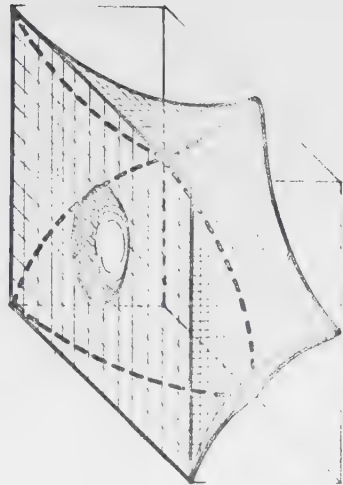
$$v_c = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot (D - z_1) \quad (72)$$

Pour chaque type de rétreint, les volumes colmatables sont respectivement :



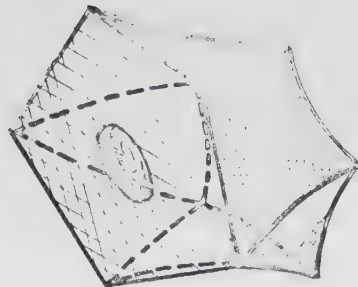
Caverne Triangulaire

$$V_{R_3} = 0,085.D^3$$



Caverne Carrée

$$V_{R_4} = 0,233.D^3$$



Caverne Pentagonale

$$V_{R_5} = 0,34.D^3$$

$$v_{R_3} - v_c, \quad v_{R_4} - v_c, \quad v_{R_5} - v_c$$

Pour l'ensemble des rétreints du milieu filtrant, nous avons :

$$V_{R_3} = (v_{R_3} - v_c) \cdot N \cdot n_3, \quad V_{R_4} = (v_{R_4} - v_c) \cdot N \cdot n_4 \text{ et } V_{R_5} = (v_{R_5} - v_c) \cdot N \cdot n_5$$

Dans notre exemple numérique :

$$V_{R_3} = 1,80 \text{ cm}^3 \quad V_{R_4} = 8,5 \text{ cm}^3 \quad V_{R_5} = 3,95 \text{ cm}^3$$

Le volume poreux total $V \varepsilon_0$ étant de $39,5 \text{ cm}^3$ la fraction :

$$C_m = \frac{V_{R_3} + V_{R_4} + V_{R_5}}{V \cdot \varepsilon_0} \quad (73)$$

du volume poreux colmatable est égale à 0,36. Les contributions des cavernes en amont des rétreints R_3 , R_4 et R_5 sont respectivement 4,5 %, 21,5 % et 10 % du volume poreux total.

Les résultats des calculs faits, pour chacun des différents empilements de sphères que nous avons utilisés, sont portés dans le tableau n° 7.

Tableau n° 7

D en mm	V_{R_3} en cc	V_{R_4} en cc	V_{R_5} en cc	$V_{R_5} + V_{R_4} + V_{R_3}$ en cc	$V \varepsilon_0$ en cc	C_m en %
2,28	1,77	7,1	3,26	12,13	37,5	32,4
2,37	1,75	8,2	3,43	13,38	38,5	34,7
2,55	1,71	8	3,59	13,30	38,5	34,6
3,2	1,80	8,5	3,95	14,25	39,5	36
3,57	1,66	7,1	3,2	11,96	37,5	32

Ce tableau nous montre que la fraction C_m du volume poreux qui est colmatable est, avec nos hypothèses, de l'ordre du tiers du volume poreux total.

55. Interprétation des résultats expérimentaux.

Dans une première partie, nous essaierons de déterminer quel est celui des trois modèles présentés au paragraphe 43, qui est le plus représentatif de la rétention des microsphères dans l'empilement de sphères schématisé par le modèle à cavernes et à rétreints.

Ce choix nous permettra de proposer, dans une deuxième partie, un mécanisme pour le colmatage de l'empilement de sphères.

5.5.1 - Choix du modèle le plus représentatif.

Pour faire ce choix, nous disposons de quatre indications:

5.5.1.1. - Evolution des grandeurs caractéristiques des différents modèles.

Le paramètre expérimental le plus influent sur ces grandeurs est le rapport des diamètres $\frac{d}{D}$. Les courbes des figures 27, 28 et 29 nous montrent l'évolution du coefficient d'entraînement λ_m , de la rétention C et du taux de remplissage β en fonction de $\frac{d}{D}$.

Le coefficient d'entraînement λ_m est une fonction très rapidement décroissante du rapport $\frac{d}{D}$. Pour les valeurs de $\frac{d}{D} \geq 0,083$, il est inférieur à 0,05, indiquant ainsi que si toutes les microsphères étaient mobiles, elles auraient une très faible vitesse vis-à-vis de celle du fluide, ce qui favoriserait leur rétention par le garnissage.

INFLUENCE du RAPPORT des DIAMETRES $\frac{d}{D}$ sur le
COEFFICIENT D'ENTRAÎNEMENT MOYEN λ_m

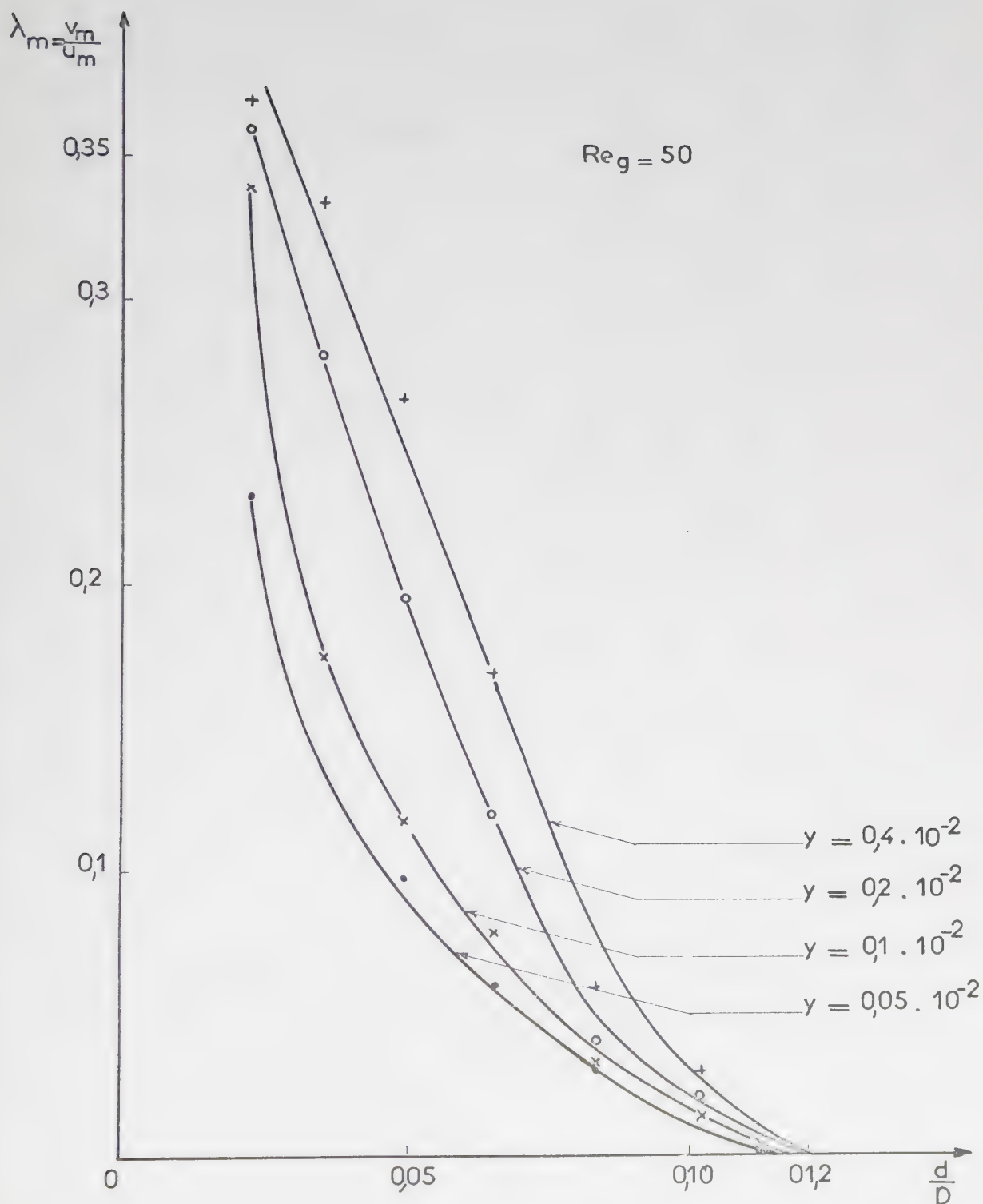


Fig 27

INFLUENCE du RAPPORT des DIAMETRES $\frac{d}{D}$ sur la RETENTION

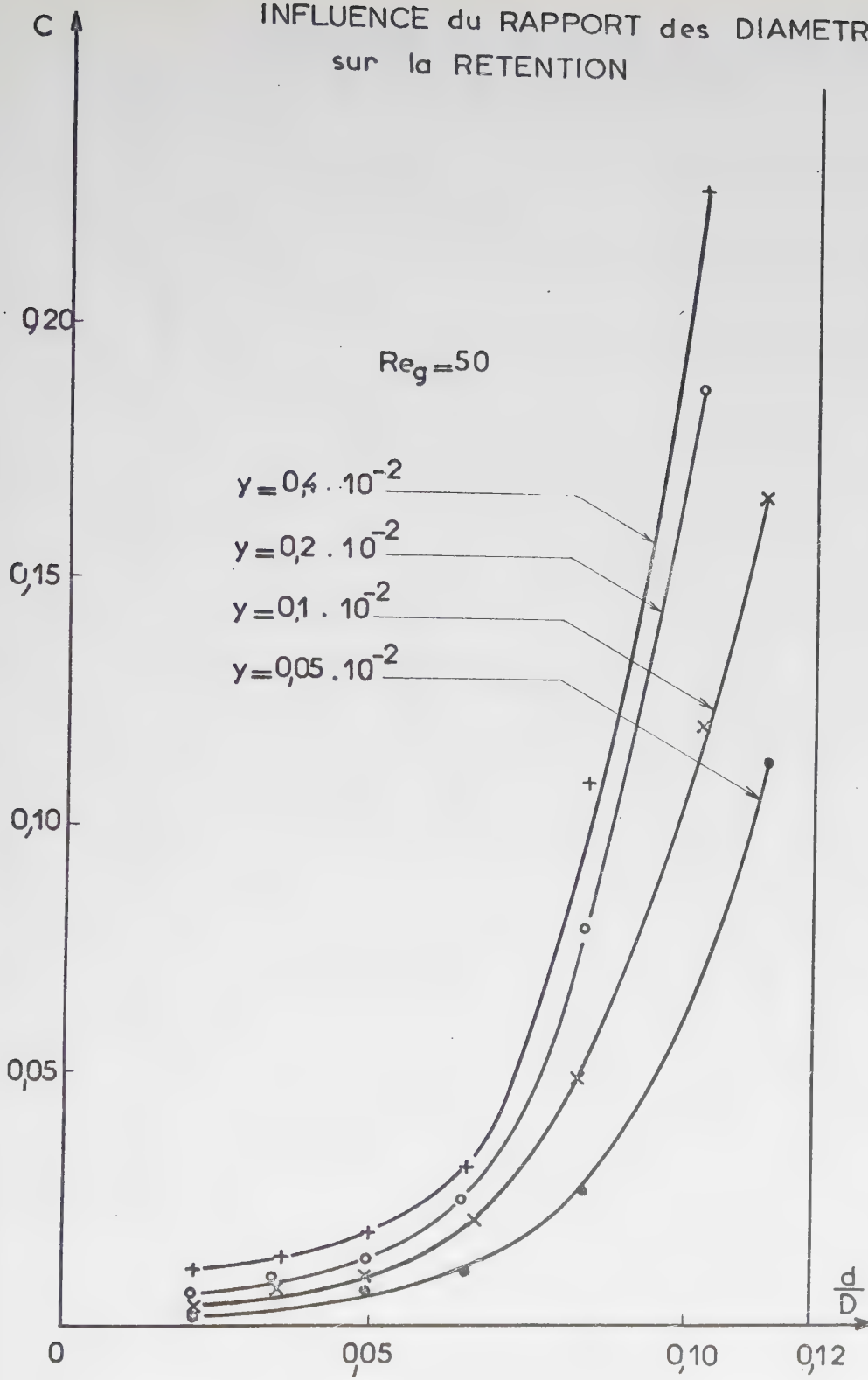


Fig 28

INFLUENCE du RAPPORT des DIAMETRES $\frac{d}{D}$ sur le TAUX de REMPLISSAGE

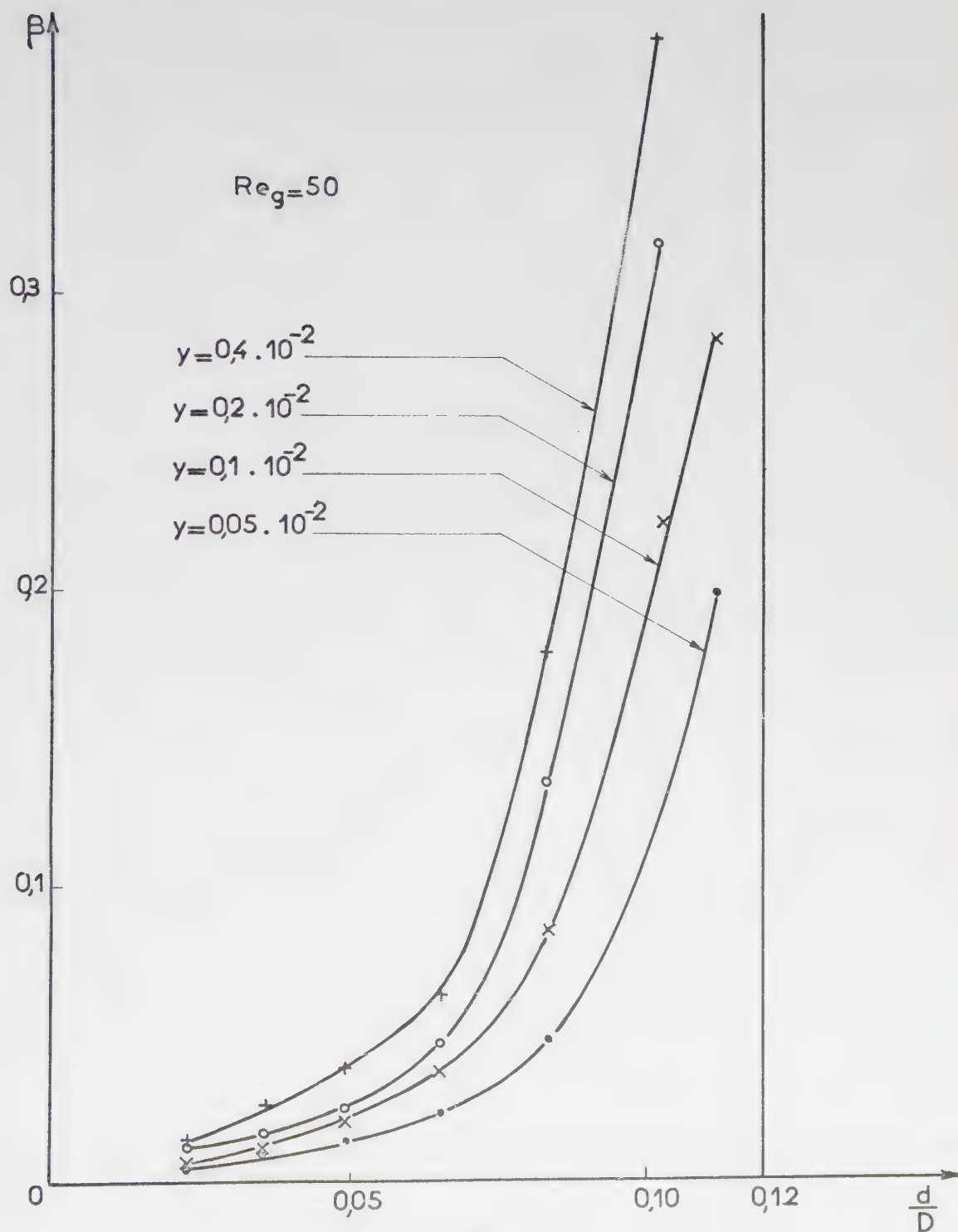


Fig 29

Il apparaît donc que le modèle admettant une concentration homogène de microsphères mobiles est très peu vraisemblable pour les grandes valeurs de $\frac{d}{D}$. Pour la plus petite valeur étudiée du rapport $\frac{d}{D}$, une telle représentation serait encore plausible, puisque, dans ce cas, la vitesse des microsphères ne serait que trois fois plus petite que celle du fluide.

Les courbes des figures 28 et 29 montrant une augmentation très nette de la rétention C ou du taux de remplissage β lorsque $\frac{d}{D} \geq 0,083$, confirment qu'il y a dans ce cas une action plus importante de la part de l'empilement de sphères qu'un simple ralentissement des microsphères.

5.5.1.2. - Evolution de la perte de charge.

Nous avons porté, dans le tableau n° 4, les valeurs du rapport $\frac{\Delta P^*}{\Delta P^{\circ}}$ de la perte de charge ΔP^* que subit la suspension traversant le milieu poreux partiellement colmaté à celle ΔP° lorsque le milieu poreux est exempt de microsphères. Pour les petites valeurs de la concentration stationnaire X^* correspondant aux valeurs du rapport $\frac{d}{D} \leq 0,065$, nous constatons que le rapport $\frac{\Delta P^*}{\Delta P^{\circ}}$ est petit ($1 < \frac{\Delta P^*}{\Delta P^{\circ}} < 1,10$).

Par contre, pour $\frac{d}{D} \geq 0,083$, ce rapport prend des valeurs sensiblement plus grandes; il peut atteindre, dans des cas extrêmes, des valeurs allant jusqu'à 3 ou 4. Comme nous le verrons au paragraphe 56, une telle augmentation ne peut être interprétée de manière satisfaisante, en admettant que l'augmentation de perte de charge résulte d'une diminution uniforme de la porosité dans le modèle du faisceau de pores de Kozeny; en admettant, au contraire, une obstruction permanente de certains rétreints, nous avons obtenu une interprétation satisfaisante des variations de perméabilité du milieu filtrant.

Le troisième modèle caractérisé par la rétention C , et dans lequel nous admettons le remplissage à un taux maximal β_i de certains sites par des grains fixes, est donc vraisemblablement le plus représentatif d'une telle obstruction permanente de certains rétreints lorsque le rapport des diamètres $\frac{d}{D}$ est grand.

5.5.1.3. - Concentrations irréversibles après lavage par un liquide pur.

Les concentrations irréversibles après lavage par un liquide pur n'étant pas nulles, nous devons éliminer le modèle caractérisé par le coefficient d'entraînement λ_m et dans lequel toutes les particules sont mobiles. Pour faire le choix entre les deux autres modèles, examinons à l'aide du modèle à cavernes et à rétreints les valeurs des concentrations irréversibles.

— Cas où $\frac{d}{D}$ est petit ($\frac{d}{D} = 0,034$)

Dans ce cas, les valeurs moyennes des concentrations irréversibles après lavage sont à co-courant $X_{i1} \approx 0,6 \cdot 10^{-2}$ et à contre-courant $X_{i2} \approx 0,5 \cdot 10^{-2}$.

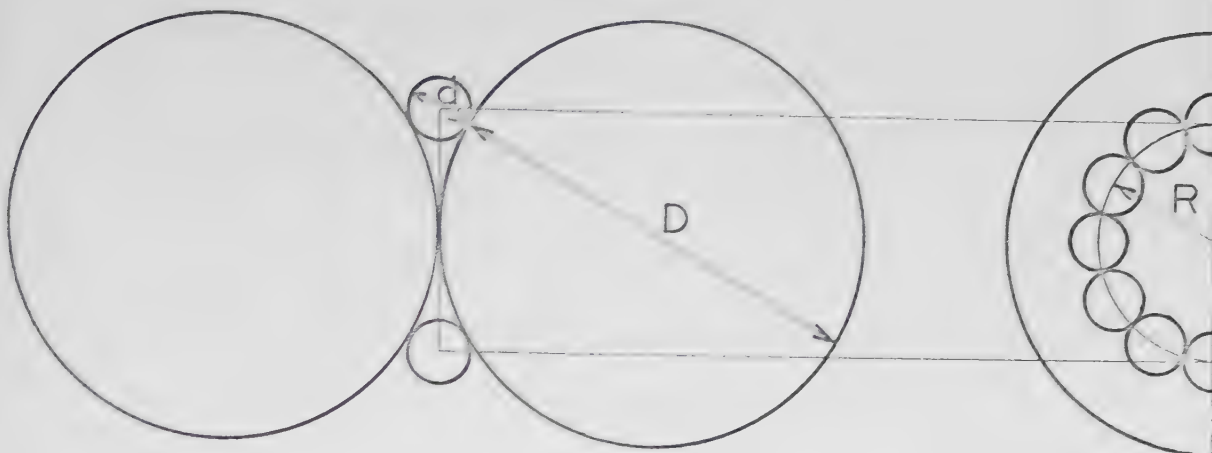
Montrons que ces valeurs correspondent approximativement au remplissage des crevasses situées au voisinage du point de contact entre deux sphères (figure n° 30). Pour calculer le nombre de ces crevasses, deux hypothèses sont possibles :

. 1ère Hypothèse : Seules, les crevasses formées par des sphères appartenant à un même feuillet, participent à la rétention. Leur nombre est alors :

$$N. [3 \cdot n_3 + 4 \cdot n_4 + 5 \cdot n_5]$$

Les centres des microsphères retenues dans ces crevasses sont placés sur un cercle admettant pour axe la droite

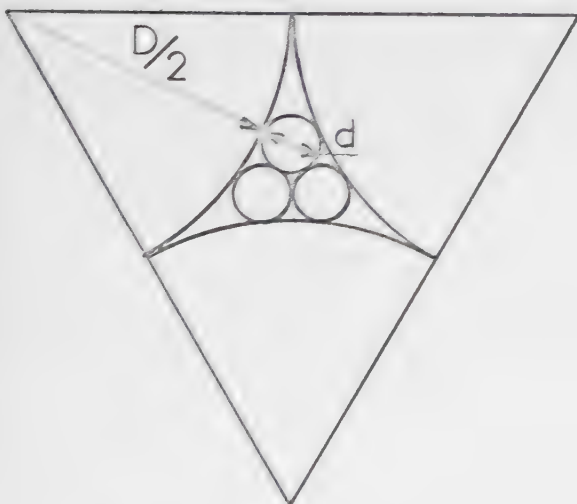
RETENTION dans un SITE de CREVASSE



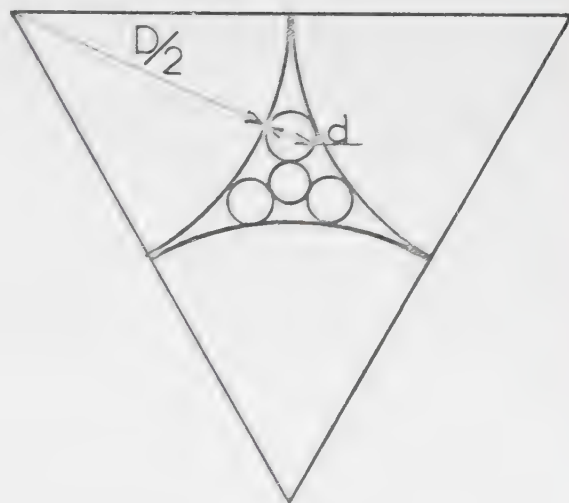
Rayon du cercle moyen dans la crevasse

$$R = \frac{d}{2} \sqrt{1 + 2 \frac{D}{d}}$$

Nombre de microsphères dans un tel site ($\frac{1}{2}$ cercle) $n \approx \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + 2 \frac{D}{d}}$



$$\left(\frac{d}{D}\right)_{\text{limite}} = 0,10$$



$$\left(\frac{d}{D}\right)_{\text{limite}} = 0,083$$

Fig 30

joignant les centres des sphères et dont le rayon est :

$$\frac{d}{2} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{D}{d}}.$$

Dans ces conditions, le nombre total de microsphères retenues dans ces crevasses est :

$$N \cdot \left[3 n_3 + 4 n_4 + 5 n_5 \right] \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{1 + 2 \frac{D}{d}}$$

Pour $\frac{d}{D} = 0,034$, ceci correspond à une concentration en microsphères dans le volume poreux : $X = 0,47 \cdot 10^{-2}$.

. 2ième Hypothèse : Toutes les crevasses participent à la rétention. N_S étant le nombre total de sphères et en admettant que la coordinance moyenne est de 8, le nombre total des crevasses est $4 \cdot N_S$. Dans le cas présent, les microsphères étant réparties sur tout le cercle moyen dans la crevasse, leur nombre est : $4 N_S \cdot \pi \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{D}{d}}$ et leur concentration $X = 0,67 \cdot 10^{-2}$.

On constate que, quelle que soit l'hypothèse adoptée, les concentrations irréversibles après lavage sont de l'ordre de grandeur de celles correspondant au colmatage des crevasses.

Il est donc probable que, pour les petites valeurs du rapport $\frac{d}{D}$, il n'y a pas d'obstruction permanente des rétreints, mais ralentissement des microsphères au passage de ces rétreints, avec possibilité de coïncage de ces microsphères dans les crevasses adjacentes aux rétreints. Le troisième modèle caractérisé par le taux de remplissage β des sites de rétention colmatables, semble donc le plus représentatif dans ce cas.

— Cas où $\frac{d}{D}$ est grand. $\frac{d}{D} = 0,112$

Dans ce cas, la concentration irréversible après lavage peut être jusqu'à 10 fois plus élevée que dans le cas précédent,

indiquant ainsi une possibilité d'obstruction de certains rétreints.

Etant donné qu'avec une telle valeur du rapport $\frac{d}{D}$ on ne peut placer une microsphère dans chacun des angles d'un rétreint triangulaire (figure n° 30) il y a vraisemblablement obstruction de tels rétreints avec remplissage des cavernes en amont de ces rétreints : ceci entraîne une augmentation de la concentration volumique en microsphères :

$$d X_1 = \frac{V_{R3} \cdot \beta_i}{V \cdot \epsilon_0} = 2,8 \cdot 10^{-2}$$

Pour les rétreints carrés et pentagonaux, il est possible, avec une telle valeur du rapport $\frac{d}{D}$ de placer une microsphère dans chacun des angles de ces rétreints et d'avoir ainsi colmatage sur toute leur longueur des crevasses adjacentes à de tels rétreints. Le remplissage de ces crevasses entraîne une augmentation de la concentration en microsphères

$$d X_2 = 3,1 \cdot 10^{-2}.$$

En admettant l'existence de ces deux modes de rétention, la concentration irréversible serait :

$$X_i = d X_1 + d X_2 = 5,9 \cdot 10^{-2}.$$

Les concentrations irréversibles obtenues expérimentalement sont portées dans le tableau n° 8.

Tableau n° 8

Concentration de la suspension colmatante y	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Concentration irrévers. après lavage à co-courant X_{i1}	$2,73 \cdot 10^{-2}$	$6,35 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$
Concentration irrévers. après lavage à contre-courant X_{i2}	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$4,25 \cdot 10^{-2}$	$4,62 \cdot 10^{-2}$

Pour le premier colmatage réalisé avec une suspension de faible concentration ($y = 0,5 \cdot 10^{-2}$), la concentration irréversible après lavage à co-courant correspond approximativement au remplissage des crevasses adjacentes aux rétreints carrés et pentagonaux. Un tel mode de rétention est confirmé par le fait que l'inversion du sens de l'écoulement du liquide pur n'entraîne qu'une faible diminution de la concentration en microsphères dans le milieu poreux.

Dans les 2 autres expériences, où la concentration de la suspension colmatante est plus grande, les concentrations irréversibles après lavage à co-courant correspondent approximativement au remplissage des cavernes triangulaires et des crevasses adjacentes aux rétreints carrés et pentagonaux.

L'inversion du sens d'écoulement du liquide pur amène, dans ce cas, une diminution importante ($\Delta X = 1$ à $2 \cdot 10^{-2}$) de la concentration X , pouvant correspondre au décolmatage d'un certain nombre des cavernes situées en amont des rétreints triangulaires. Le liquide contourne les cavernes qui n'ont pas été décolmatées.

Ces résultats confirment la possibilité, pour les valeurs élevées du rapport $\frac{d}{D}$, d'une obstruction permanente de certains rétreints lors de l'écoulement de la suspension.

5.5.1.4. - Interprétation géométrique.

L'analyse des résultats expérimentaux nous a montré que, quelle que soit la valeur du rapport $\frac{d}{D}$, il y a colmatage des sites de crevasse adjacents aux rétreints; l'empilement de sphères comprenant essentiellement des rétreints triangulaires, examinons un tel rétreint dont les angles sont colmatés (figure n° 30); une microsphère ne pourra passer au centre d'un rétreint ainsi colmaté que si le rapport $\frac{d}{D}$ est inférieur à 0,0813.

En admettant un tel mécanisme, il n'y aurait obstruction permanente des rétreints triangulaires que pour les valeurs du rapport $\frac{d}{D}$ supérieures à cette valeur critique. Les rétentions élevées que nous avons obtenues avec de tels rapports $\frac{d}{D}$ confirment cette hypothèse.

-Remarque : L'irreproductibilité des concentrations irréversibles après lavage, obtenues avec un rapport $\frac{d}{D} = 0,0915$, est peut-être due au fait que ce rapport est voisin du rapport critique 0,0813; il est en effet possible que, dans ce cas, une très petite variation du diamètre des microsphères arrivant sur les rétreints triangulaires, entraîne soit leur obstruction permanente, soit, au contraire, les laisse libres pour l'écoulement de la suspension.

En définitive, il apparaît que, pour les valeurs élevées du rapport $\frac{d}{D}$ (0,083; 0,102 et 0,112, toutes supérieures à la valeur critique 0,0813), il y a vraisemblablement obstruction permanente de certains rétreints et que le modèle le plus représentatif est celui caractérisé par la rétention C (modèle II); tandis que, pour les petites valeurs de $\frac{d}{D}$ (0,022; 0,035; 0,049 et 0,065, toutes inférieures à 0,0813), le modèle le plus représentatif doit être celui caractérisé par le taux de remplissage β des sites de rétention colmatables (modèle III).

5.5.2 - Discussion du mécanisme de colmatage de l'empilement de sphères.

Ce mécanisme doit tenir compte, non seulement de la disposition probable à l'état stationnaire des microsphères dans les sites de rétention, mais aussi de l'ordre de grandeur du temps mis pour atteindre cet état stationnaire.

Le mécanisme que nous proposons se décompose en deux phases :

— Dans une première phase, lorsque la suspension pénètre dans l'empilement de sphères non colmaté, il y a vraisemblablement ralentissement des microsphères au passage des rétreints entraînant une augmentation sensible du taux de remplissage β des cavernes en amont de ces rétreints. Cette phase correspond à l'augmentation rapide de la concentration moyenne X observée au début de l'écoulement de la suspension.

— Dans la deuxième phase, il doit y avoir un colmatage progressif des sites de crevasses, suivi dans le cas des valeurs élevées du rapport $\frac{d}{D}$ d'une obstruction de certains rétreints. Cette deuxième phase, qui est lente et n'existe pas dans le colmatage du réseau de cylindres, doit être la cause de l'augmentation très importante du temps mis pour atteindre l'équilibre stationnaire de colmatage de l'empilement de sphères par rapport à celui observé dans le cas du réseau de cylindres.

Le processus lent de cette deuxième phase est le colmatage des sites de crevasses, d'une part parce qu'il est commun à tous les rapports $\frac{d}{D}$ étudiés, et explique que, dans tous les cas, nous ayons trouvé des temps de mise en équilibre d'au moins une heure, d'autre part, lorsque les rétreints sont obstrués, le remplissage de cavernes en amont est rapide.

Il apparaît donc que le facteur contrôlant le temps mis pour atteindre l'état stationnaire est vraisemblablement le colmatage des sites de crevasses.

La constante de temps T_r de la relation (60) doit être du même ordre de grandeur que le temps t_c mis pour colmater les sites de crevasse. Celui-ci est fonction, d'une part, du débit Q . y de particules, d'autre part de la probabilité P

qu'une particule a de se placer dans un site de crevasse, et d'y rester.

La probabilité P_1 pour qu'une particule vienne se placer dans un site de crevasse, dépend du temps de séjour de la particule dans le milieu filtrant, donc du débit Q et du volume v'_c des sites de crevasse non colmatés.

$$P_1 = f_1 (Q, v'_c)$$

La probabilité P_2 pour qu'une particule fixe a de rester dans un tel site, dépend de la turbulence dans le milieu filtrant, donc du débit Q et du nombre de chocs des particules en mouvement susceptibles de la réentraîner, c'est-à-dire de la concentration y de la suspension

$$P_2 = f_2 (Q, y)$$

Il en résulte que la probabilité, pour que ces deux événements se produisent, est :

$$P = P_1 \cdot P_2 = f_1 (Q, v'_c) \cdot f_2 (Q, y) = f (Q, y, v'_c) \quad (74)$$

La variation du volume des sites de crevasses non colmatés est entre les instants t et $t + dt$:

$$- d v'_c = f (Q, y, v'_c) \cdot Q \cdot y \cdot dt$$

$$d'où \quad dt = \frac{1}{Q \cdot y} \cdot \frac{d v'_c}{f (Q, y, v'_c)}$$

Le débit et la concentration de la suspension étant constants, nous obtenons, par intégration :

$$t_c = \frac{1}{Q \cdot y} \cdot \int_{(v'_c)_m}^{(v'_c)^*} \frac{d v'_c}{f (Q, y, v'_c)} \quad (75)$$

Le calcul de cette intégrale, qui donne l'ordre de grandeur du temps de mise en équilibre de colmatage; nécessite la connaissance de la fonction $f(Q, y, v'_c)$. Celle-ci ne peut pas être constante, car s'il en était ainsi, le temps t_c , donc approximativement le temps de mise en équilibre, serait inversement proportionnel au produit $Q \cdot y$ alors qu'expérimentalement, en faisant varier ce produit dans le rapport de 1 à 80, nous n'avons pas constaté de variations importantes et significatives du temps de mise en équilibre de colmatage.

Par contre, la probabilité de capture dans un site de crevasse augmentant avec le temps de séjour de la particule dans l'empilement de sphères, la fonction $f(Q, y, v'_c)$ doit décroître lorsque le débit Q augmente. D'autre part, le nombre de chocs des particules en mouvement sur une particule fixe favorisant le réentraînement, la probabilité P doit être une fonction décroissante de y . Ces sens de variation, prévisibles, auraient pour effet de compenser l'influence du terme $Q \cdot y$ au dénominateur du deuxième membre de l'équation (75) et de rendre le temps t_c indépendant du débit de particules à travers le milieu filtrant.

56. Perméabilité de l'empilement de sphères partiellement colmaté.

5.6.1 - Mode de présentation des résultats expérimentaux.

L'augmentation de perte de charge due au colmatage du milieu filtrant n'est sensible que pour les débits et les rétentions importantes; les seuls résultats significatifs ont été obtenus pour $\frac{d}{D} = 0,083; 0,102$ et $0,112$ avec des valeurs du critère de Reynolds comprises entre 50 et 150.

Dans ces conditions d'écoulement turbulent, la perte de charge peut être représentée par une formule à deux termes,

dont l'un est relatif au frottement visqueux, et l'autre à la dissipation d'énergie mécanique par turbulence, soit :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \eta \cdot R_L \cdot u_0 + \rho \cdot R_T \cdot u_0^2 \quad (76)$$

Nous pouvons définir une résistance globale apparente R_A du milieu filtrant par la relation :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \eta \cdot R_A \cdot u_0 \quad (77)$$

avec
$$\eta \cdot R_A = \eta \cdot R_L + \rho \cdot R_T u_0 \quad (78)$$

A débit constant, R_A est uniquement fonction de la concentration X en microsphères dans le milieu filtrant.

Nous appellerons perméabilité relative de ce milieu le rapport :

$$B_r = \frac{(R_A)_0}{(R_A)^*} \quad (79)$$

de la résistance $(R_A)_0$ globale du milieu poreux exempt de microsphères à la résistance $(R_A)^*$ du milieu partiellement colmaté.

Cette perméabilité relative est une fonction décroissante de la rétention dans le milieu poreux (figure n° 32).

5.6.2 - Comparaison avec l'équation d'Ergun.

L'équation d'Ergun, directement dérivée de la théorie de Kozeny, assimilant un milieu poreux à un faisceau de pores cylindriques, est une représentation semi-empirique satisfaisante de la perte de charge subie par un fluide s'écoulant en régime laminaire ou turbulent dans un milieu poreux constitué par un empilage de grains convexes. Son expression est la suivante :

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_K \cdot \frac{\eta \cdot s_g^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot u_o + h_B \cdot \frac{\rho \cdot s_g (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot u_o^2 \quad (80)$$

h_K et h_B étant des constantes et la surface spécifique s_g étant égale à $\frac{6}{D}$ dans le cas d'un empilement de sphères.

Dans ce modèle, les résistances spécifiques en régime laminaire et turbulent ont respectivement pour expression :

$$R_L = h_K \cdot \frac{s_g^2 \cdot (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad \text{et} \quad R_T = h_B \cdot \frac{s_g \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

Afin de tester la validité du modèle de Kozeny pour notre étude, nous avons calculé la perte de charge à partir de la relation d'Ergun en prenant pour valeur de la porosité du milieu partiellement colmaté $\varepsilon = \varepsilon_o (1 - C)$, ($1 - C$ est la fraction du volume poreux libre pour l'écoulement de la suspension), et en supposant que la surface spécifique s_g reste constante.

En comparant les valeurs ainsi calculées aux valeurs obtenues expérimentalement (figure n° 31) nous constatons que ces dernières sont sensiblement supérieures à celles calculées, même en tenant compte du léger effet de bouts constaté en l'absence de rétention et dû vraisemblablement aux grilles supportant le garnissage. Il en résulte que, dans les conditions expérimentales où nous avons opéré, le modèle du faisceau de pores cylindriques de Kozeny n'est pas une très bonne représentation de l'empilement de sphères partiellement colmaté.

Il faut cependant noter que KRASOVITSKIY et JUJIKOV¹⁸ ont interprété de façon relativement satisfaisante leurs résultats expérimentaux à l'aide du modèle de Kozeny. Toutefois, ces résultats ont été obtenus dans des conditions opératoires très différentes des nôtres, (rapport des diamètres $\frac{d}{D} = 10^{-3}$ et concentration de la suspension $y = 10^{-6}$).

$10^{-2} \cdot \Delta P$
en Pascals

COMPARAISON avec le MODELE de KOZENY

120

ΔP expérimentale

80

40

Effet de bouts

ΔP calculée par la
formule d'Ergun
avec $\xi = \xi_0(1-C)$

5

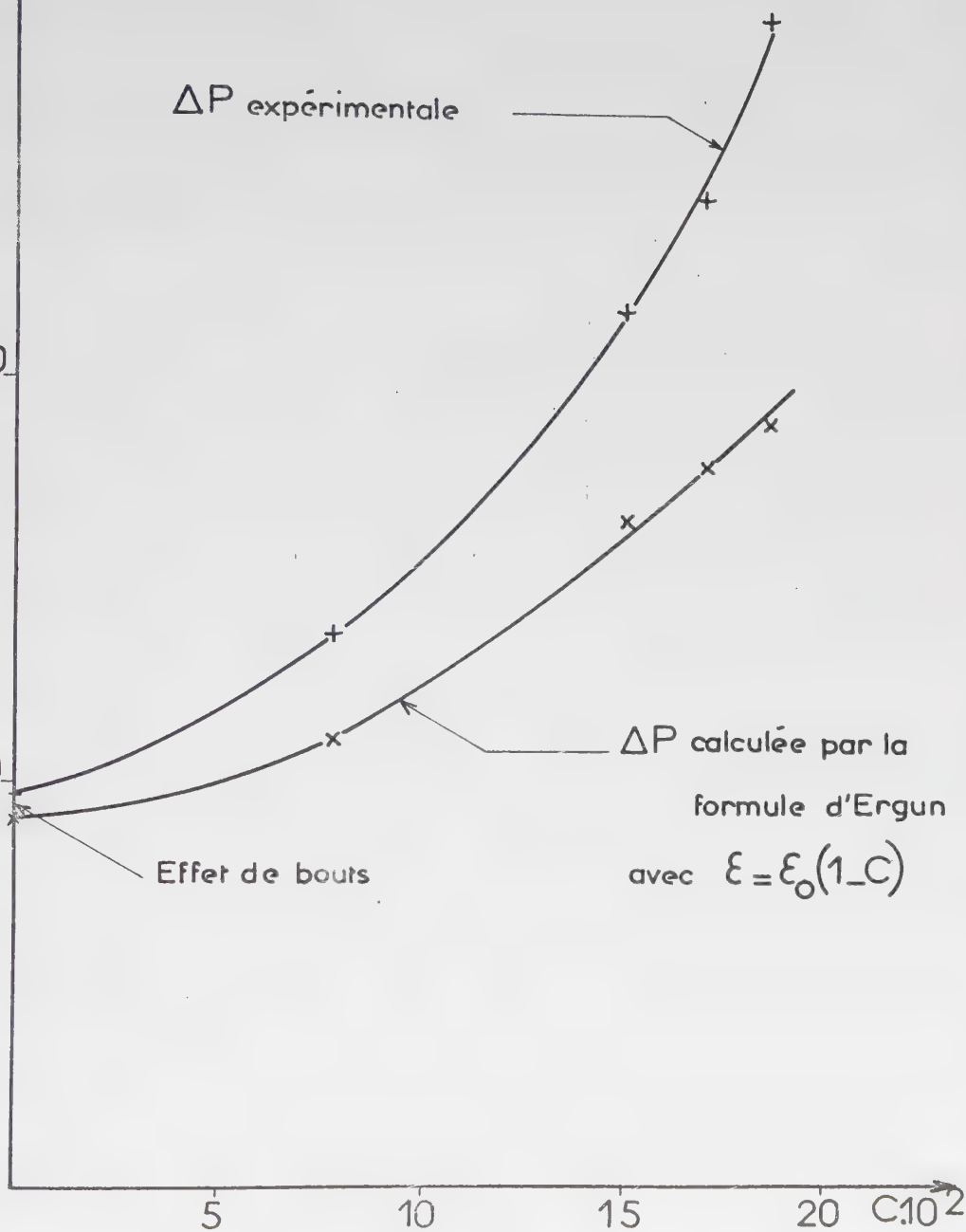
10

15

20

$C \cdot 10^2$

Fig 31



-Remarque : Dans le calcul de la perte de charge par l'équation d'Ergun, nous avons posé $\epsilon = \epsilon_0 \cdot (1 - C)$, au lieu de $\epsilon = \epsilon_0 \cdot (1 - X)$ afin de tenir compte du liquide mort situé entre les grains fixes. De plus, si nous avons pris la concentration X au lieu de la rétention C l'écart avec les valeurs expérimentales aurait été encore plus accentué, car X est inférieur à C .

5.6.3 - Interprétation de la variation de perméabilité relative à l'aide du modèle à cavernes et à rétreints.

Les variations importantes de perte de charge, donc de perméabilité, ayant été obtenues avec les grandes valeurs du rapport $\frac{d}{D}$ (0,083, 0,102 et 0,112) nous caractériserons le colmatage par la grandeur la plus représentative dans ce cas, la rétention C dans les sites colmatables du modèle à cavernes et à rétreints.

Les rétreints triangulaires étant ceux qui présentent la plus faible surface pour le passage des microsphères, ils se colmateront vraisemblablement les premiers. Aussi, pour la suite du raisonnement, nous admettrons que la rétention se fait progressivement, en commençant par les sites de cavernes en amont des rétreints triangulaires, puis, lorsque ceux-ci seront colmatés, il y aura remplissage des cavernes en amont des rétreints carrés et, enfin, éventuellement colmatage de celles en amont des rétreints pentagonaux.

D'autre part, nous ferons l'hypothèse que la résistance à l'écoulement d'un rétreint libre est négligeable vis-à-vis de celle d'un rétreint colmaté.

Pour évaluer la perméabilité relative B_r , nous devons déterminer la résistance apparente $(R_A)_0$ du milieu poreux non colmaté et celle $(R_A)^*$ du milieu partiellement colmaté.

a) Résistance hydraulique du milieu poreux non colmaté.

La résistance hydraulique apparente R_{A_0} de l'empilement de N feuillets en série de résistance spécifique r_f est $R_{A_0} = N \cdot r_f$.

La conductance r_f^{-1} de chaque feuillet est la somme des conducteurs des rétreints triangulaires, carrés et pentagonaux, soit :

$$\frac{1}{r_f} = \frac{n_3}{r_3} + \frac{n_4}{r_4} + \frac{n_5}{r_5}$$

En admettant que les conductances hydrauliques des rétreints sont proportionnelles à leurs surfaces respectives, nous obtenons :

$$\frac{1}{r_f} = \frac{n_3 + 5 n_4 + 13 n_5}{r_3}$$

où r_3 est la résistance hydraulique spécifique d'un rétreint triangulaire.

En définitive, la résistance apparente de tout le milieu poreux est :

$$R_{A_0} = \frac{N \cdot r_3}{n_3 + 5 n_4 + 13 n_5} \quad (81)$$

b) Résistance hydraulique du milieu poreux partiellement colmaté.

Dans ce cas, il reste en moyenne, dans un feuillet $n'_3 < n_3$ rétreints triangulaires, $n'_4 < n_4$ rétreints carrés et $n'_5 < n_5$ rétreints pentagonaux non colmatés et donc libres pour l'écoulement de la suspension.

Connaissant la rétention C^* nous pouvons déterminer les nombres n'_3 , n'_4 et n'_5 . $V \cdot \epsilon_o \cdot C^*$ étant le volume colmaté, trois cas peuvent se présenter :

1) $V \cdot \epsilon_o \cdot C^*$ inférieur à V_{R_3} : il n'y a pas eu colmatage de tous les rétreints triangulaires $n'_3 = n_3 \left(1 - \frac{V \cdot \epsilon_o \cdot C^*}{V_{R_3}}\right)$

Les autres types de rétreints ne sont pas colmatés : $n'_4 = n_4$ et $n'_5 = n_5$.

2) $V_{R_3} < V \cdot \epsilon_o \cdot C^* < V_{R_3} + V_{R_4}$: Tous les rétreints triangulaires sont colmatés, $n'_3 = 0$, et aucun rétreint pentagonal n'est colmaté : $n'_5 = n_5$.

Dans ce cas :

$$n'_4 = n_4 \left(1 - \frac{V \cdot \epsilon_o \cdot C^* - V_{R_3}}{V_{R_4}}\right)$$

3) $V_{R_3} + V_{R_4} < V \cdot \epsilon_o \cdot C^* < V_{R_3} + V_{R_4} + V_{R_5}$

Dans ce cas, $n'_3 = n'_4 = 0$, et il y a une fraction des rétreints pentagonaux colmatés :

$$n'_5 = n_5 \left(1 - \frac{V \cdot \epsilon_o \cdot C^* - (V_{R_3} + V_{R_4})}{V_{R_5}}\right)$$

La résistance hydraulique des rétreints colmatés étant supposée beaucoup plus grande que celle des rétreints libres, la résistance hydraulique apparente du milieu poreux partiellement colmaté a pour expression :

$$R_A^* = \frac{N \cdot r_3}{n'_3 + 5 n'_4 + 13 n'_5} \quad (82)$$

Il en résulte que la perméabilité relative est :

$$B_r = \frac{n'_3 + 5 n'_4 + 13 n'_5}{n_3 + 5 n_4 + 13 n_5} \quad (83)$$

Nous avons tracé, sur la figure n° 32, la courbe théorique obtenue à partir de la relation (83), représentative de la fonction $B_r = f(C)$; elle est composée de deux segments de droite correspondant, l'un au remplissage des cavernes en amont des rétreints triangulaires ($C < 4,5 \cdot 10^{-2}$), et l'autre au remplissage des cavernes en amont des rétreints carrés ($4,5 \cdot 10^{-2} < C < 26 \cdot 10^{-2}$).

D'autre part, puisque nous comparons les résistances apparentes à un même débit, les valeurs expérimentales de la perméabilité relative nous sont données par la relation :

$$B_r = \frac{R_{A_0}}{R_A} = \frac{\Delta P_0}{\Delta P} \quad (84)$$

On observe un accord satisfaisant entre la courbe théorique et les résultats expérimentaux (voir figure n° 32 et tableau n° 9); la majorité des points expérimentaux se situe dans la zone correspondant au remplissage progressif des cavernes en amont des rétreints carrés, tandis que quelques résultats obtenus avec le rapport $\frac{q}{D}$ le plus faible (0,083) se trouve dans le domaine de rétention où toutes les cavernes en amont des rétreints triangulaires ne sont pas colmatées.

PERMEABILITE RELATIVE en FONCTION de la RETENTION

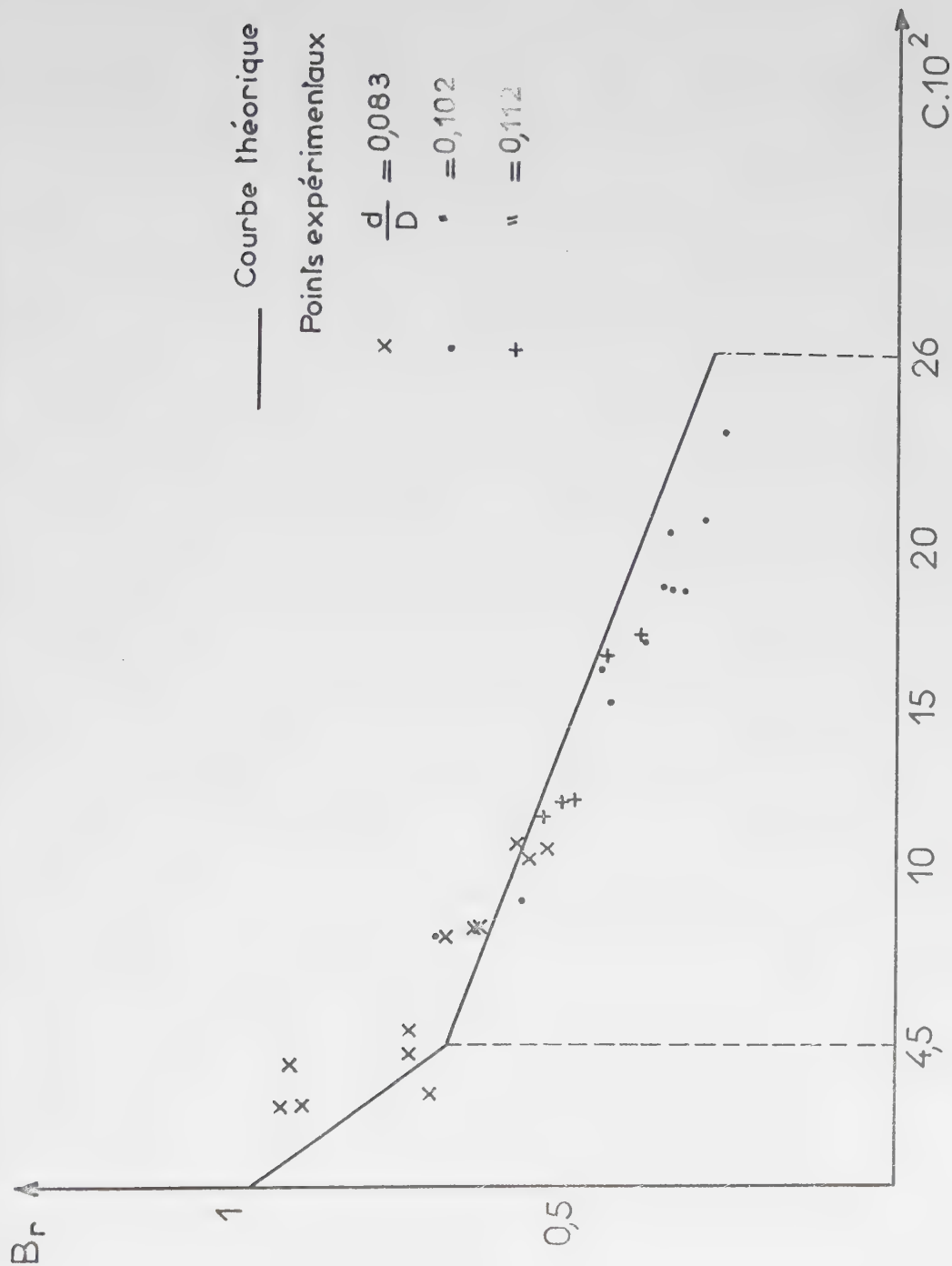


Fig 32

TABLEAU N° 9

$$\frac{d}{D} = 0,083$$

Re_p	136	136	136	136	86	86	86	90	46	48	46	46
$v \cdot 10^2$	0,05	0,1	0,2	0,4	0,05	0,1	0,2	0,4	0,05	0,1	0,2	0,4
$\Delta P_o \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	49,5	49,5	49,5	49,5	25,8	25,8	25,8	27,5	9,7	10,4	9,7	9,7
$\Delta P \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	52,1	53	70,5	87	28,3	34,5	40	50,5	13,4	13,8	14,6	16,5
$C \cdot 10^2$	2,52	3,81	7,8	10,05	2,60	4,16	8	10,5	2,87	4,86	8	10,6
Br calculée	0,82	0,745	0,63	0,59	0,83	0,72	0,63	0,58	0,81	0,685	0,63	0,58
Br experim.	0,945	0,935	0,70	0,57	0,91	0,75	0,645	0,545	0,72	0,75	0,655	0,59

$$\frac{d}{D} = 0,102$$

Re_p	119	119	119	119	71,5	73	73	73	52,5	52,5	46
$v \cdot 10^2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
$\Delta P_o \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	38,7	38,7	38,7	38,7	15,8	16,6	16,6	16,6	11	11	9,7
$\Delta P \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	54,7	87	98	116,5	27,2	36,6	47,7	55,2	30,4	31,5	36
$C \cdot 10^2$	7,75	15,05	17	18,6	8,9	16,1	18,6	20,8	18,7	20,4	23,5
Br calculée	0,635	0,50	0,46	0,43	0,61	0,495	0,43	0,39	0,43	0,40	0,34
Br experim.	0,705	0,445	0,395	0,33	0,58	0,46	0,35	0,30	0,36	0,355	0,27

$$\frac{d}{D} = 0,112$$

Re_p	99	65	65	32	28
$v \cdot 10^2$	0,05	0,05	0,1	0,05	0,1
$\Delta P_o \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	75	34	34	10,2	8,2
$\Delta P \cdot 10^{-2}$ (Pascals)	150	62	75	19,6	20,5
$C \cdot 10^2$	12	11,5	16,5	11,9	17,2
Br calculée	0,56	0,57	0,47	0,56	0,45
Br experim.	0,50	0,55	0,45	0,52	0,40

57. Conclusion sur la rétention dans un empilement de sphères.

Cette étude nous a essentiellement révélé l'existence, sous certaines conditions, d'un régime stationnaire de "colmatage-décolmatage" dans une filtration par un milieu poreux granulaire. Un tel équilibre réversible vis-à-vis du débit de suspension ou de liquide pur nous a conduit à admettre l'existence du réentraînement des microsphères, donc d'une vitesse de décolmatage, au cours de la filtration. La validité du schéma cinétique qui en résulte a, toutefois, besoin d'être confirmée par des expériences plus nombreuses que celles que nous avons faites pour cette partie de notre travail.

Nous avons constaté, d'autre part, que l'augmentation de concentration X dans l'empilement de sphères était due, non seulement au ralentissement des microsphères analogue à celui observé dans le cas du réseau de cylindres, mais aussi à une capture plus ou moins réversible des microsphères par le milieu poreux.

Ces deux effets ne sont pas discernables par des mesures de concentration moyenne, mais ont pu être mis en évidence par des expériences de lavage par un liquide pur. Le premier de ces deux effets est prépondérant dans le cas des faibles valeurs du rapport $\frac{d}{D}$ tandis que le second domine lorsque $\frac{d}{D}$ est grand. Toutefois, comme ils coexistent quelles que soient les valeurs du rapport $\frac{d}{D}$ où il y a colmatage réversible, les résultats expérimentaux ont été présentés sous les trois formes du coefficient d'entraînement λ_m , du taux de remplissage β et de la rétention C .

Par ailleurs, les variations importantes de perte de charge, que nous avons constatées durant le colmatage avec des rapports $\frac{d}{D}$ élevés, nous ont amené à proposer un modèle plus représentatif que celui de Kozeny pour un empilement de

sphères en cours de colmatage. Cependant, l'adaptation d'un tel modèle à un milieu granulaire quelconque nécessite une connaissance approfondie de la texture et des caractéristiques pour l'écoulement d'un fluide, notamment la perméabilité, d'un tel milieu.

- CONCLUSION -

Tout au long de ce travail, nous avons essayé de dégager et d'analyser les processus élémentaires mis en jeu dans le phénomène de "colmatage-décolmatage" d'un milieu filtrant. Pour réaliser cette analyse, au lieu d'accumuler de nombreux résultats dans des conditions expérimentales complexes, nous avons préféré faire des expériences simples permettant d'éliminer certaines actions, comme l'adhérence ou la diffusion moléculaire, et de faire varier indépendamment les uns des autres certains paramètres.

La méthode expérimentale nouvelle, que nous avons mise au point pour déterminer la concentration en particules dans nos modèles de filtre, a permis l'étude de l'influence sur le colmatage des principaux paramètres : le débit de la suspension, sa concentration et le rapport de la dimension des particules à celle des grains du garnissage. En particulier, ce dernier paramètre nous a révélé l'importance de la description de la texture du milieu filtrant dans le cas où il y a rétention des particules par des forces d'origine mécanique. Il est d'ailleurs probable que si les différents chercheurs qui ont étudié le phénomène de colmatage n'ont attaché qu'une relativement faible importance à cette description, c'est parce que, dans leurs conditions expérimentales, les forces de rétention mécanique étaient faibles vis-à-vis des forces d'adhérence.

La texture relativement simple des différents modèles de filtres utilisés nous a permis de proposer un schéma pour le mécanisme de la rétention dans les différents sites. Cependant, une nouvelle étape dans la détermination de ce mécanisme devra être franchie en répétant les mêmes expériences avec des milieux poreux plus complexes, mais de texture bien connue, et en précisant l'aspect cinétique du phénomène.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. IWASAKI T. ; J.A.W.W.A. 1937, 29, 1591
2. STEIN P.C. ; Sc. D. Thèse, M.I.T. ; 1940
3. SHEKTMAN Yu, ORNATSKII N.V. et SERGEJEV ; Université de Moscou 1955. "Recherche du processus de colmatage des sables".
4. IVES K.J. ; Proceedings of the symposium on the interaction between fluids and particles - 3^e congrès Européen de Génie Chimique. 1962. Londres
5. LING J.T. ; "A study of filtration through Uniform Sand filters" Proc. A.S.C.E. - 1955 - 81 - Article n° 751
6. ELIASSEN R. ; J.A.W.W.A. 1941, 33, 926
7. IVES K.J. ; Proc. Inst. Civ. Engrs. 1963, 25, 345
8. MACKRLE V. ; Thèse - Université de Grenoble - 1960
9. HALL W.A. ; Jour. of Sanitary Eng. Division (P.A.S.C.E.) 1957, 1276 - 81
10. MAROUDAS A. ; Chemical Engineering Science - 1965, Vol. 20, p.867 - 888
11. MINTS D.M. ; Doklady Akad Nauk 1951, 78, Ser.2, 315
12. MINTS D.M. et KRISHTUL ; Zhurnal Prikladnoi khimii ; 1960, 34, 304
13. IVES K.J. ; Water and Water Engineering : 1961, September, 385
14. MAROUDAS A. ; Filtration and Separation - 1965, Sept. October - p. 369 à 372
15. WHITE et SMITH ; "High efficiency air filtration" 1964 - London - (Butterworths)
16. HAUPT ; Chem. Techn ; 1958, Mai, 10, 5, 300.
17. HERMANS et BREDEE ; Rec. trav. Chim. Pays-Bas - 1935, 54, 680
18. KRASOVITSKIY Yu et JUJIKOV V.A. ; Industrie Chimique, U.R.S.S., 1963, 2, 129 et 132
19. IVES K.J. ; Chemical Engineering Science - 1965, Vol. 20, p. 965 - 973

20. GHOSH G. ; Water and Water Engineering ; 1958, mai, 147
21. HEERTJES P.M. ; Chemical Engineering Science ; 1957, vol.6, .
p. 190 à 203
22. MAC GEARY ; Journal of the American Ceramic Society - 1961 -
Octobre, 44, 10
23. WHITMORE R.L. ; "Rheology of disperse Systems" 1959 -
Pergamon Press - London
24. SUTHERLAND J.P., VASSILATOS G., HIROSHI KUBOTA et OSBERG, G,L;
A.I. Ch.E Journal; 1963 July - Vol.9
25. CHILDS et COLLIS-GEORGE ; Proc. Roy. Soc ; 1950, A, 201 - 392
26. MARSHALL T.J. ; -J. Soil Science, 1958, 57,I
- Symposium on the interaction **between** Fluids and Particules -
Institution of Chem. Eng. - 1962

N o t a t i o n s

B_r	perméabilité relative du milieu filtrant
C	rétention dans le milieu filtrant
C_i, C_m, C_r	fractions de volume poreux
d	dimension des particules en suspension
D	dimension des grains constituant le milieu filtrant
e	distance minimale entre les cylindres
E_c	énergie cinétique d'une particule
F	force s'exerçant sur une particule
i	intensité électrique
I	intensité lumineuse
k	coefficient de filtration
k_c, k_d, k_r	constantes de vitesse
K	constante d'équilibre
m	masse d'une particule
n_i, n'_i	nombre de rétreints
N	nombre de feuillets
N_S	nombre de sphères
Q	débit de suspension
r_3, r_4, r_5	résistances hydrauliques des rétreints
R_L, R_T, R_A	résistances hydrauliques du milieu filtrant
Re_g	nombre de Reynolds
s_g	surface spécifique de grain
S	surface de la section droite du milieu filtrant

t	temps
T_G, T_l	temps de séjour
u	vitesse d'écoulement du liquide
v	vitesse d'une particule
v_s	vitesse de sédimentation d'une particule
V	volume total du milieu filtrant
V_a	vitesse apparente de colmatage
V_c	vitesse réelle de colmatage
V_d	vitesse de décolmatage
X	concentration volumique en particules dans le volume poreux
y	concentration volumique de la suspension
z	coordonnée longitudinale dans le milieu filtrant
Z	hauteur du milieu filtrant
α	angle
β	taux de remplissage
ΔP	perte de charge à travers le milieu filtrant
ε	porosité
η	viscosité
λ	coefficient d'entraînement
ρ	masse volumique
σ	écart-type
τ	temps de séjour
Φ	diamètre des cylindres

TABLE DES MATIERES

<u>Introduction</u>	Pages
Chapitre I. <u>Processus élémentaires de la filtration</u>	
1.1. Description des sites de rétention	1
1.2. Processus de capture des particules	3
1.3. Processus de réentraînement des particules	4
Chapitre II. <u>Travaux antérieurs sur le colmatage</u>	
2.1. Aspect cinétique	6
2.2. Aspect énergétique	10
2.3. Aspect géométrique	13
Chapitre III. <u>Etude sur modèles : Méthode expérimentale et grandeurs caractéristiques</u>	
3.1. Introduction	16
3.2. Méthode expérimentale	
3.2.1. Principe de la méthode	18
3.2.2. Dispositifs expérimentaux	18
3.2.3. Caractéristiques des matériaux employés	22
3.2.4. Etalonnages	24
3.3. Modèles de colmatage et grandeurs caractéristiques	
3.3.1. Répartition des vitesses	26
3.3.2. Modèle général	27
3.3.3. Modèle I	29
3.3.4. Modèle II	30
3.3.5. Modèle III	32

Chapitre IV.	<u>Etude de la rétention de microsphères dans un réseau de cylindres</u>	
4.1.	Rétention dans un réseau de cylindres en quinconce	34
4.2.	Rétention dans un réseau de cylindres jointifs et alignés	39
4.3.	Rétention dans un réseau de cylindres jointifs et en quinconce	
4.3.1.	Etude sans sédimentation des microsphères	42
4.3.2.	Etude avec sédimentation des microsphères	45
4.4.	Conclusion	51
Chapitre V.	<u>Etude de la rétention de microsphères dans un empilement de sphères</u>	
5.1.	Etude de la cinétique du phénomène de colmatage	
5.1.1.	Description et réversibilité du phénomène	52
5.1.2.	Cinétique de la variation de concentration	54
5.1.3.	Résultats expérimentaux	56
5.2.	Etude de l'état stationnaire	
5.2.1.	Analogie formelle avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir	59
5.2.2.	Influence des divers paramètres sur la concentration stationnaire	60
5.3.	Etude du lavage d'un empilement de sphères partiellement colmaté	
5.3.1.	Processus expérimental et description du phénomène	71
5.3.2.	Résultats expérimentaux	72

5.4.	Le modèle à cavernes et à rétreints	75
5.5.	Interprétation des résultats expérimentaux	
5.5.1.	Choix du modèle le plus représentatif	80
5.5.2.	Discussion d'un mécanisme de colmatage	86
5.6.	Perméabilité de l'empilement de sphères partiellement colmaté	
5.6.1.	Mode de présentation des résultats expérimentaux	89
5.6.2.	Comparaison avec l'équation d'Ergun	90
5.6.3.	Etude de la perméabilité relative	92
5.7.	Conclusion sur la rétention dans un empilement de sphères	97

<u>Conclusion.</u>	99
--------------------	----

Références bibliographiques

Nomenclature.

Nom de l'étudiant : DELAUBRIÈRE Yves

Nature de la Thèse : Thèse de doctorat d'état

Titre de la Thèse : "NOTION DE FLOI A L'ETUDE DE L'ÉCOULEMENT D'UN
MÉCANISME A TRAVERS UN MILIEU POREUX ET DE MÉCANISME DE LA "PERMEABILITÉ"

Vu et Approuvé

Nancy le 1er Mars 1966

Le Doyen

J. AUBRY

Vu et Permis d'imprimer

Nancy le 3 mars 1966

Le Recteur
Président du Conseil de
l'Université

P. IMBS

DEUXIEME THESE

Proposition donnée par la Faculté :

TRANSFERT DE CHALEUR ENTRE UN GAZ ET LES PARTICULES D'UN MILIEU
POREUX GRANULAIRE

Cet exemplaire est imprimé
à des fins particulières et ne
peut en aucun cas être vendu.

Achevé d'imprimer le 8 mars 1966
à l'Atelier de Documentation Universitaire
3, Rue Sellier, 3 NANCY

Depot légal N° 181 E.N.S.I.C. Editeur
1er trimestre 1966

